

PROJETO DE CONCEPÇÃO DE UM NAVIO PATRULHA DE FORMAS NÃO-
CONVENCIONAIS COM CARACTERÍSTICAS SUBMERSÍVEIS: VIABILIDADE
E MANOBRABILIDADE

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS
EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Aprovada por:

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
DEZEMBRO DE 2005

Projeto de Concepção de um Navio
Patrulha de Formas Não-Convencionais com
Características Submersíveis: Viabilidade
e Manobrabilidade [Rio de Janeiro] 2005

XIII, 377 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ,
D.Sc., Engenharia Oceânica, 2005)

Tese - Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Concepção de Híbrido

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

PROJETO DE CONCEPÇÃO DE UM NAVIO PATRULHA DE FORMAS NÃO-
CONVENCIONAIS COM CARACTERÍSTICAS SUBMERSÍVEIS: VIABILIDADE
E MANOBRABILIDADE

Dezembro/2005

Orientadores:

Programa: Engenharia Oceânica

Este trabalho apresenta a concepção de um novo veículo de combate destinado à defesa da costa, para o preenchimento das recentes lacunas estratégicas e táticas surgidas no início do século XXI. Caracteriza sua missão e investiga quais os requisitos de desempenho exigidos através da busca entre concepções alternativas: um SWATH, um semiplaneio, e planeio, com e sem casco duplo. Para tanto, faz-se o projeto conceutivo de uma série de embarcações-solução em que se processa o cálculo da resistência ao avanço (submersa e superfície), propulsão, arranjo, topologia estrutural, pesos e centros de gravidade, convergindo para escolha do semiplaneio, a mais eficiente. Mede-se o desempenho das alternativas (overall measure of effectiveness, OMOE) com o uso de uma ferramenta de análise multi-critério, a análise de envoltória de dados (data envelopment analysis, DEA), que também permite fazer escolhas quanto às adaptações necessárias e direções de projeto a serem tomadas de forma a otimizar o desempenho global. Enfim, estuda-se a manobra da forma vencedora em que se discutem os critérios de manobra, os métodos para o cálculo de derivadas hidrodinâmicas e se propõe uma solução alternativa para o seu cálculo no plano vertical.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the
requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

CONCEPT DESIGN OF A NON-CONVENTIONAL PATROL BOAT WITH
SUBMERSIBLE CHARACTERISTICS: FEASIBILITY AND MANOUVERABILITY

December/2005

Advisors:

Department: Ocean Engineering

This work presents a conception of a new combat vehicle for coastal defense, to fulfill a new tactic and strategic lapse which arose in the beginning of the 21st century beginning. It characterizes the vehicle mission and the performance needs through the study of alternative conceptions: SWATH, planing and semi-displacement, mono and double-hulled. The systematic study is done through the preliminary design for each alternative with the calculation of forward resistance (immersed and on the surface), general arrangement, structural topology, weights and centres of gravity, propulsion, resulting in the choice of a semi-displacement craft, the most efficient. The efficiency of each alternative (OMOE - overall measure of effectiveness) is measured with the use of a multicriteria tool, DEA (data envelopment analysis), which allows, in a new fashion, for choices among design directions in order to optimize the design. Finally, maneuverability criteria and methods are studied for the winning alternative. This resulted in the proposition of an alternative method of calculation of hydrodynamic derivatives on the dive plan.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.2	REVISÃO DE MEDIDAS DE EFICIÊNCIAS DO NAVIO.....	24
2.3	REVISÃO DA MANOBRA.....	29
3	CARACTERIZAÇÃO DA MISSÃO E DAS CLASSES DE NAVIOS.....	30
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA MISSÃO.....	31
3.2	CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE.....	58
3.3	DETERMINAÇÃO DOS REQUISITOS.....	61
4	METODOLOGIA DE PROJETO.....	70
4.1	METODOLOGIA DE PROJETO.....	71
5	PROCESSO DE PROJETO.....	90
5.1	PARTICULARIDADES DO PROJETO DO PATRULHA SUBMERSÍVEL..	91
5.2	PROCESSO DE PROJETO DAS VERSÕES SWATH E V1 A V3.....	93
5.3	PROCESSO DE PROJETO DAS VERSÕES COM CASCO RESISTENTE DE FORMA NÃO CILÍNDRICA (MONOCASCO, V4, V5 E V5A).....	96
5.4	PROCESSO DE PROJETO - VERSÃO V6.....	97
5.5	DESLOCAMENTO PRELIMINAR.....	98
5.6	TRIPULAÇÃO E NAVEGAÇÃO.....	106
5.7	ANÁLISE DA FORMA DA PROA E DA POPA.....	107
5.8	ESTIMATIVA DE POTÊNCIA INSTALADA POR SEMELHANTES....	110
5.9	EQUIPAMENTOS NO INTERIOR DO CASCO RESISTENTE.....	115
5.10	ARRANJO PRELIMINAR.....	117
5.11	COMPRIMENTO DO CASCO RESISTENTE.....	128
5.12	DIMENSIONAMENTO PRELIMINAR DO PESO E DA ESTRUTURA DO CASCO RESISTENTE (V1,V2,V3).....	129
5.13	DEFINIÇÃO DA FORMA HIDRODINÂMICA (V1,V2,V3).....	131
5.14	HIDROSTÁTICAS DO SWATH.....	139
5.15	PLANO DE BALIZAS E PERFIL (V2 E V2A).....	140
5.16	HIDROSTÁTICAS (V2 E V2A).....	142
5.17	RESULTADO PARCIAL: ABANDONO DA VERSÃO SWATH.....	143
5.18	SISTEMAS AUXILIARES (SOMENTE VERSÃO V2).....	144

5.19	RESISTÊNCIA AO AVANÇO.....	166
5.20	PROPULSÃO.....	171
5.21	ESTRUTURAS (V2A).....	187
5.22	PESO DO HÍBRIDO (V2A).....	224
5.23	DIMENSIONAMENTO DE TANQUES (V2A).....	231
5.24	ANÁLISE DA ESTABILIDADE (APENAS V2A).....	232
5.25	COMENTÁRIOS SOBRE A ESTABILIDADE.....	238
5.26	COMPORTAMENTO NO MAR (V2A).....	239
6	MANOBRA.....	247
6.1	PRELIMINARES.....	250
6.2	EQUACIONAMENTO DA MANOBRA.....	256
6.3	O DESACOPLAMENTO.....	258
6.4	ÍNDICE DE ESTABILIDADE.....	263
6.5	INTRODUÇÃO DE LEMES E RABETAS.....	268
6.6	RAIO DE GIRO EM REGIME PERMANENTE NO PLANO HORIZONTAL.....	270
6.7	DISTÂNCIA DE PARADA.....	272
6.8	ADIMENSIONALIZAÇÃO.....	274
6.9	CÁLCULO DAS DERIVADAS HIDRODINÂMICAS.....	276
6.10	CÁLCULO DAS DERIVADAS HIDRODINÂMICAS DE VELOCIDADE...	277
6.11	DISCUSSÃO SOBRE AS OS MÉTODOS ANALÍTICO EMPÍRICOS	278
6.12	CÁLCULO DAS DERIVADAS HIDRODINÂMICAS NO PLANO HORIZONTAL.....	279
6.13	DERIVADAS HIDRODINÂMICAS DO PLANO VERTICAL.....	296
6.14	RESUMO DO CÁLCULO DE DERIVADAS HIDRODINÂMICAS DE VELOCIDADE.....	303
6.15	DISCUSSÃO SOBRE A TEORIA DE FAIXAS E CONSERVAÇÃO DE ENERGIA.....	305
6.16	CÁLCULO DAS MASSAS ADICIONAIS.....	306
6.17	SÉRIES DE DADOS EXPERIMENTAIS.....	310
6.18	DERIVADAS HIDRODINÂMICAS DO LEME E RABETAS.....	312
6.19	DISCUSSÃO SOBRE O MÉTODO DE CÁLCULO MAIS APROPRIADO	313

6.20	CRITÉRIOS DE MANOBRABILIDADE.....	323
6.21	TESTES.....	326
6.22	RESULTADOS NESSA FASE DE PROJETO	327
6.23	COMENTÁRIOS FINAIS SOBRE A MANOBRABILIDADE	331
7	MEDIDAS DE DESEMPENHO (V2A)	333
7.1	MEDIDAS DA EFICIÊNCIA DO PROJETO	337
7.2	A ANÁLISE DE ENVOLTÓRIA DE DADOS	339
7.3	RESULTADOS DAS MEDIDAS	343
8	VERSÕES V4, V5, V5A E V6	347
8.1	CARACTERÍSTICAS DAS VERSÕES V4 A V6	350
8.2	COMENTÁRIOS ÀS VERSÕES V4, V5, V5A E V6	353
9	CONCLUSÃO.....	354
10	BIBLIOGRAFIA	357
	APÊNDICES	368
A)	FORÇAS DE INÉRCIA	369
B)	MOMENTOS	371
C)	VOLUME ÚTIL NO INTERIOR DE UM CILINDRO.....	376

LISTA DE SÍMBOLOS

LATINOS

* - símbolo de multiplicação

x – símbolo de multiplicação

%L - razão entre o comprimento e o LCG

$\hat{A}$ – ângulo de ataque

Ax- área da seção mestra

Ac.- Acesso.

Acr –área da seção transversal do casco resistente.

Ad- avanço.

Alq ou alq - alquebramento

App – área dos apêndices.

AR – razão de aspecto.

As - area da seção transversal do reforçador, sem chapa colaborante

Atr – área do transom.

aut - autonomia

B – boca

B/T – boca/calado.

BHP - potência entregue pelo motor em hp, quando referente ao navio é a soma dos BHPs de todos os motores por extensão, ou seja, a potência instalada.

BkW – BHP em kW

BkW_x – BkW na velocidade x

BWL – boca na linha d'água.

BM – raio metacêntrico.

BMt – raio metacêntrico transversal.

BMI – raio metacêntrico longitudinal.

C.C. - corrente contínua.

Cb ou C_B – Coeficiente de Bloco.

CI – coeficiente de indiscrição.

C_D - coeficiente de arrasto.

C_f - coeficiente de atrito.

C_L - coeficiente de sustentação.

Cp - coeficiente prismático.

C_x - coeficiente de seção mestra.
 C_r - coeficiente de resistência residual.
 C_t - coeficiente de resistência total.
 C_w – coeficiente de resistência de ondas.
 C_{wl} – coeficiente de linha d'água.
 d_{cav} –distância entre cavernas.
 D - diâmetro do casco resistente, ou ,quando se referir à manobra, pontal.
 $Desl$ – deslocamento.
 DG – diesel gerador.
 $DGkW$ – Potência em kW do diesel gerador.
 dt - diâmetro do torpedo.
 E – módulo de Young , ou de elasticidade do material.
 e - inclinacao do eixo propulsor em relação à quilha
 EHP – é a potência necessária para o movimento do navio em certa velocidade em hp
 EkW – é o EHP em kW
 F – reserva de flutuação na definição americana.
 f – reserva de flutuação na definição italiana.
 f_p - distância normal à linha de eixo entre VCG e o ponto de aplicação da força de empuxo.
 F_n – número de froude.
 FS – fator de segurança
 G – parâmetro geométrico da casca.
 g – aceleração da gravidade.
 GEP – gerador elétrico de potência.
 GOR – grupo de osmose reversa.
 GM – altura metacêntrica.
 GM_t - altura metacêntrica transversal.
 GM_l - altura metacêntrica longitudinal.
 H – parâmetro geométrico da casca.
 h – altura
 I - momento de inércia do reforçador com chapa colaborante.
 I_z - momento de inércia do reforçador sem chapa colaborante por um eixo radial que atravessa a grelha.
 k – função de espessura.

KB- distância entre a quilha e o centro de carena.

KG- distância entre a quilha e o centro de gravidade.

L – comprimento genérico. No item casco cilíndrico, maior comprimento entre Lb e Ls.

L/B – razão comprimento boca.

Lb espaço sem apoio entre reforçadores.

Lcr – comprimento do casco resistente.

Lc - comprimento do compartimento para considerações globais de instabilidade estrutural, igual a Lcr ou a Lb, conforme o caso. Pode também se referir ao método de Savitsky, sendo igual ao comprimento, a partir da popa, até a intersecção da linha de água com a boca.

Le comprimento da chapa colaborante que atua no reforçador, o menor entre $1.5 (Rt)^{1/2}$ ou $0.75 Ls$

Lk - valor de comprimento molhando na quilha.

ln – distância entre momentos nulos.

Ls distância de centro a centro dos reforçadores

LCB- longitudinal do centro de Carena

LCF – longitudinal do Centro de Flutuação, A da seção mestra para ré, e F da seção mestra para vante.

LCG – posição longitudinal do centro de gravidade.

LOA – comprimento Total (length overall).

lt - comprimento do torpedo.

LWL - comprimento na linha d'água (length water line).

MBT – tanque de lastro principal (main ballast tank).

MOE – Medida de eficiência (*measure of overall effectiveness*).

MOP – Medida de desempenho operacional (*measure of performance*).

MT1 – momento para alterar o trim de 1 cm.

N – parâmetro geométrico da casca.

nt - número de tubos de torpedo

Numiter é o número de iterações.

OMOE – Medida global de eficiência (*overall measure of effectiveness*) que congrega MOE e MOP

P – pressão de operação.

p – pressão de carregamento.

Pa – pressão máxima admissível para qualquer modo de falha.

P_{all} – pressão máxima admissível global (menor dentre as P_a).
 P_c – pressão limite entre os reforçadores da estrutura cilíndrica.
 P_l – pressão longitudinal correspondente ao regime elástico.
 P_m – pressão de flambagem de Von Mises para um cilindro.
 P_n – pressão global de flambagem para um cilindro.
 P_S - pressão das garrafas de ar comprimido quando cheias.
 $PPAR$ – perpendicular a ré.
 $PPAV$ – perpendicular a vante.
 ppm – partes por milhão.
 Q – parâmetro geométrico da casca.
 q – vazão mássica.
 $Prof$ ou $prof$ – profundidade.
 R - raio médio do cilindro, calota ou elipse.
 RA - raio de ação.
 reg - regressão.
 Re – n° de Reynolds ($V \cdot L / \nu$).
 R_f - raio até o topo do reforçador a partir da casca. Também pode se referir a resistência friccional.
 R_{giro} – raio de giro.
 R_o - raio externo
 ROV – Veículo submersível não tripulado, operado remotamente (*remoted operated vehicle*).
 R_s - raio até o centróide do reforçador, sem chapa colaborante.
 R_t – resistência ao avanço total.
 s - espaçamento entre vigas.
 SD - distância de parada.
 SFD – solution focused design.
 SSC – submarino costeiro
 SSK – submarino convencional (*Submarine Submarine killer*)
 $SWBS$ – Grupos de Peso. (*Ship Work Breakdown Structure*).
 T – calado.
 t - espessura, para o casco resistente espessura da casca.
 $Taylor$ – n° de Taylor.
 TCB – distância entre o centro de carena e plano central longitudinal.

TPC – tonelada por centímetro de imersão.
 TL – tanque de lastro.
 Tos ou tos – tosamento.
 Tp – empuxo do propulsor.
 Tr – afastamento.
 trip- tripulação.
 trim – trim em graus.
 t_w - espessura da grelha de reforçadores.
 V – velocidade.
 VCB – posição vertical do centro de empuxo.
 VCG - posição vertical do centro de gravidade.
 Vcr – volume do casco resistente.
 Vmax – velocidade máxima
 Vol – volume
 Vsub - velocidade submersa.
 Vsup - velocidade na superfície.
 VTC - volume do tanque de compensação.
 VTL – volume dos tanques de lastro.
 w – coeficiente de esteira.
 Wr - volume de água deslocada pelas dimensões dinâmicas de um casco planador, uma espécie de deslocamento em velocidade.
 yln – posição vertical da linha neutra a partir da quilha.

GREGOS

α - ângulo de ataque.
 β - ângulo de pé-de-caverna.
 γ - peso específico, $\gamma = \rho g$.
 Δ - deslocamento.
 η - eficiência.
 η_p - coeficiente propulsivo
 θ - parâmetro geométrico da casca.
 Λ - percentagem de crescimento de comprimentos.
 λ - fator de escala.

ν - viscosidade cinemática, ou, coeficiente de Poisson, no cálculo estrutural.

ρ - massa específica.

σ_1 – tensão primária.

σ_2 – tensão secundária longitudinal.

σ_{2p} – tensão secundária longitudinal no perfil pesado

σ_{2l} – tensão secundária longitudinal no perfil leve

σ_{2t} – tensão secundária transversal.

σ_3 – tensão secundária.

σ_D – compressão máxima no flange.

σ_e – tensão de referência de Euler.

σ_y – tensão de escoamento.

τ_1 - tensão de cisalhamento primária..

τ_{2p} – tensão de cisalhamento secundária longitudinal no perfil pesado

τ_{2l} – tensão de cisalhamento secundária longitudinal no perfil leve

1 INTRODUÇÃO

1.1.1 HISTÓRICO DO CONTEXTO GEOGRÁFICO E ESTRATÉGICO DA CONCEPÇÃO¹

Nos anos após o colapso da URSS, muitas marinhas, entre elas a americana, modificaram sua política de marinha de águas azuis (“blue water”), oceânicas, para marinha de águas marrons (“brown water”) (JOERGENSEN, 1998). Isso significa deixar de dar combate às esquadras das grandes potências e passar a fazer intervenções contra países que não disponham de grande poder naval (VIDIGAL, 1997).

As águas costeiras são um ambiente propício ao ocultamento de pequenos navios e submarinos e existe um campo de desenvolvimento para uma série de novas tecnologias de adaptação das atuais existentes. Novamente, como no período anterior ao da primeira guerra mundial, o submarino convencional passa a ser visto como a arma das potências inferiores, capaz de fazer frente à ameaça de grandes potências (GUERRA, 1964).

Atualmente dois são os tipos de submarinos convencionais (ARMO, 2000): SSC (submarino costeiro, coastal) e os SSK (*submarine submarine killer*, nomenclatura da OTAN, apud <http://www.subnetitalia.it/skhome.htm>, acesso: 17/02/05). Segundo Armo (2000), os SSC são pequenos com deslocamento entre 500 e 1500 t projetados para operações costeiras e eventualmente em águas azuis, enquanto os SSK, por sua vez, operam normalmente em águas azuis, tendo um raio de ação semelhante aos de fragatas, seu deslocamento é maior que 1500 t chegando a 6600 t (submarino I400, Japão, 1945).

Para pequenas potências, os custos de um grande submarino são praticamente insuportáveis, pois, além das despesas com a aquisição, é necessária a existência de pessoal altamente especializado e material apropriado em terra para que se dê a adequada manutenção a esses meios. (custo de aquisição US\$ 250 milhões , IKL, type 212, in <http://www.global-defence.com/1999/seasys/sea1.htm>, acesso: 17/02/05).

Os navios patrulha são os navios mais necessários às nações mais pobres. Essencialmente usados no patrulhamento e defesa da costa, seu custo é dez a vinte vezes

¹ A denominação da concepção é muitas vezes abreviada para simplesmente *Patrulha Submersível* ou *Híbrido* em vez de *Navio Patrulha de Formas Não Convencionais com Características Submersíveis*

o custo dos submarinos, prestando-se ainda a missões de busca e salvamento de vidas humanas e ao atendimento de populações carentes. Essa última tarefa é dificilmente desenvolvida pelos submarinos por suas limitações em carga e calado. (os navios patrulha Freemantle (Austrália), US\$ 15 milhões, e FAC, US\$ 20.6 milhões, in [http://www.navyleague.org / seapower/ south_africa_approves_plan_to_bu.htm](http://www.navyleague.org/seapower/south_africa_approves_plan_to_bu.htm), acesso em 15/10/03).

O emprego, em tempo de guerra, dos navios patrulha, contudo, é grandemente neutralizado pelo seu pequeno poder de fogo e baixo poder de detecção. Normalmente, os navios patrulha bem armados são desprotegidos da aviação embarcada (helicópteros orgânicos) constituindo alvos fáceis e permitindo sua detecção horas antes pelas fragatas e corvetas possuidoras desses aviões.

O cenário internacional, portanto, converge novamente para a criação de pequenos submarinos, solução praticamente abandonada desde 1945. E nesse contexto exclui os países periféricos.

Parece natural propor-se a criação de uma embarcação que desempenhe igualmente as funções de navio-patrulha e submarino, tão importante na paz como na guerra, aliando o baixo custo de um, com a temeridade do outro.

Essa embarcação defenderia os portos e negaria o uso do mar, em tempo de guerra à nação interventora. Em tempo de paz, exerceria missões de patrulha ou salvatagem. Serviria, outrossim, para o treinamento das tripulações de submarinos e a formação de projetistas e técnicos da área, a um custo operacional menor que um submarino SSK.

O treinamento, em si, já é uma missão de grande importância. Para se ter idéia do que significa o preparo de tripulações, ao término da Segunda Guerra Mundial, os japoneses ainda dispunham de muitas aeronaves, mas já não conseguiam repor suas perdas por falta de pessoal qualificado para voar. Além disso, a construção dessa embarcação permite uma construção continuada diferentemente de um grande submarino que utiliza os recursos apenas uma única vez, o que permite a manutenção da capacidade de projeto de um país com poucas encomendas.

O período ora atravessado pela humanidade lembra muito o do início do século XX. Nessa época, todas as potências beligerantes imperialistas (Alemanha, EUA, Inglaterra, Itália, Japão, Rússia) desenvolveram navios submersíveis e lanchas torpedeiras para se contrapor a suas maiores ameaças: os couraçados.

Pelo seu custo, os couraçados eram uma realidade de difícil concretização. Por outro lado, as torpedeiras, de baixo custo, sempre operando à noite, ou em baixa visibilidade, representavam perigo real e compensavam amplamente seu desenvolvimento.

Nessa época surgiu o conceito de submarino de defesa de porto, de certa forma aqui reabilitado. Foram esses pequenos submersíveis que impediram a invasão da Rússia pelo Japão após Tsushima, em 1905, demonstrando o poder das armas que destroem navios.

Bem mais poderoso que esses submersíveis, esse veículo híbrido pretende, por fim, preencher essa lacuna aberta pela assimetria do poder mundial, funcionando como o conjunto de um patrulha, com alto grau de detecção; um submarino com características de grande desempenho na superfície e uma mina tripulada, capaz de selecionar seus alvos.

1.1.2 OBJETIVOS DA TESE E CONTRIBUIÇÕES

Procura-se a solução para os seguintes problemas:

- (i) Saber se é possível a criação de uma embarcação simultaneamente adequada para realizar algumas funções de um submarino e de navio patrulha, preenchendo a lacuna existente na defesa. Em caso afirmativo, qual seria sua forma e seu tipo de concepção? Dentre as concepções existentes como cascos de deslocamento, planadores, aerobarcos, WIG, SWATH ou simplesmente submarino modificado?
- (ii) Quais são as especificações técnicas necessárias para garantir a eficiência dessa embarcação?
- (iii) Como medir a qualidade dessa embarcação em relação às possíveis combinações de outras embarcações existentes?
- (iv) Em vista das possíveis características diferentes apresentadas por essa embarcação, qual o impacto na manobrabilidade?

Para atender os requisitos conflitantes de alto desempenho operativo na superfície e capacidade para submergir, descobriu-se ser necessário e, mais, único caminho, simultaneamente, minimizar o peso, maximizar a velocidade na superfície (e portanto, a potência instalada), miniaturizar equipamentos e reduzir a tripulação. Dessa forma, poder-se-ia reduzir o volume interno e reduzir o peso.

Diferentemente do projeto conceutivo de submarinos típicos, onde todo o projeto é peso-dependente, ou seja, o controle de peso é vital para a exequibilidade do projeto, nesse caso, o veículo submersível é peso-dependente e também volume-dependente, ou seja, deve-se carregar muito, num reduzido espaço.

Esses rigorosos condicionantes (peso e volume) exigiram a adoção de muitas soluções inéditas até 2003, como por exemplo, a adoção de turbinas a gás e hidrojetos. De fato, hoje alguns projetos conceptivos adotam essa solução como a nova concepção da BMT Defence Services Ltd (subsidiária da British Maritime Technology Ltd (BMT)).

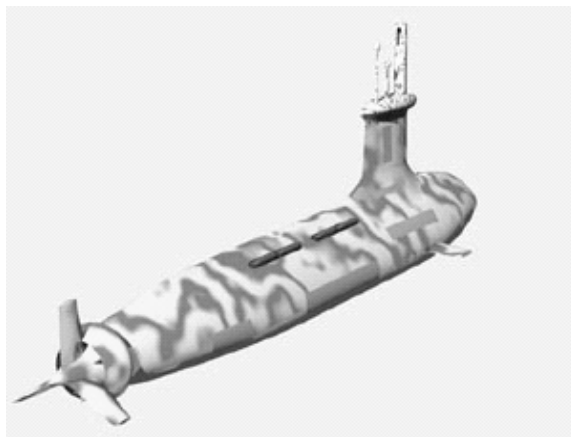


Figura 1 -Concepção de Submarino com turbinas a gás e células de combustível (New High..., 2004)

O veículo proposto, então, apresenta-se como um navio patrulha capaz de submergir o que resulta nas seguintes vantagens para a concepção:

- (i) Baixa silhueta radar, dificultando a detecção;
- (ii) Reduzida possibilidade de ser detectado por aeronaves, quando submerso;
- (iii) Boa capacidade para operar em mar agitado.

Para se ter uma idéia da real contribuição do patrulha submersível na esfera da tática, devem-se avaliar o significado para as potências que possivelmente possam empregá-lo. Para as potências que possuem o controle aéreo, um pequeno navio de superfície está protegido e dificilmente pode ser alvo de aeronaves, pois representa desperdício de material para elas, que preferem atacar os grandes navios.

Quando, entretanto, está-se diante de uma força muito superior, que possua o domínio dos mares e espaço aéreo contíguo, os grandes navios já foram retirados de operação totalmente. Nesse caso, a única forma de combater é ocultar-se. Isso indica o sentido de projeto do patrulha submersível: ocultar-se nas águas.

A capacidade de ocultação sob as águas é o maior obstáculo às operações litorâneas. O tempo para desenvolvimento tecnológico de contra-medidas eficazes é grande e o investimento deve ser elevado (*Littoral Anti-submarine Warfare Concept*, 1998). O gráfico a seguir apresenta o que é de fato a gravidade da ameaça submarina na guerra no mar, mostrando o submarino no quadrante superior direito, com alta dificuldade técnica e elevado risco para as forças americanas (o que permite ter-se uma idéia da ameaça representada pelo patrulha submersível):

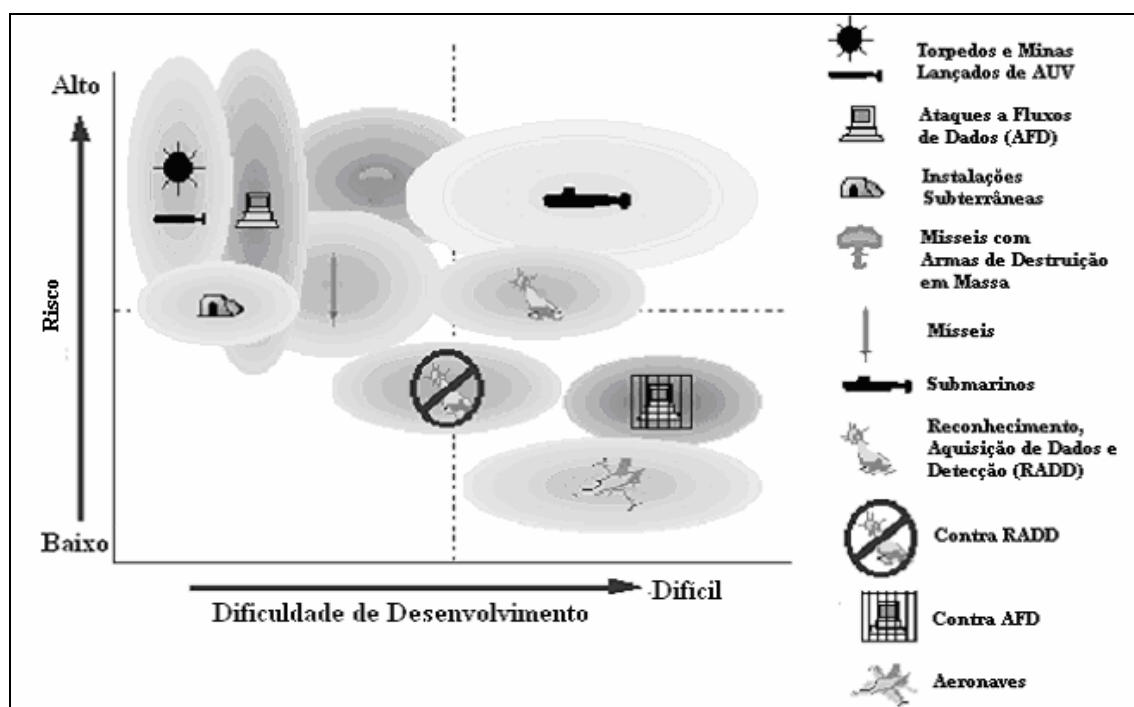


Figura 2 – Risco para as Forças Americanas (*Littoral Anti-submarine Warfare Concept*, 1998)

Estima-se que as razões pelas quais talvez não se expliquem estudos anteriores sobre o assunto sejam, por um lado, que o conjunto de países com capacidade para construir e projetar submarinos (ou submersíveis) é exíguo e, por outro, é que as grandes potências se preocupam com a existência de meios baratos, mas eficazes de defesa, pois esses meios são ameaças significativas ao tráfego e a forças navais em conflitos regionais (REVELLE e LUMPE, 1994).

Revelle e Lumpe (1994) apresentam também a preocupação das grandes potências quanto à segurança dos submarinos nucleares em face da ameaça costeira representada por submarinos convencionais como o Agosta, IKL, etc. A propósito, esses autores delimitam os países (Figura 4) que se utilizam dos submarinos convencionais e os apresentam em comparação aos nucleares (Figura 3).

A produção de submersíveis e, sobretudo a concepção e projeto do patrulha submersível, então, pode ser intentada, principalmente, onde já se reúne um conjunto consideravelmente grande de informações sobre o tema, e mais, onde se tem interesse em pequenas embarcações desse tipo, o que talvez explique seu surgimento em um dos países co-produtores (Brasil, conforme Figura 3 adaptada de Reville e Lumpe, 1994).

Attack Submarines for Sale (Vendem-se Submarinos de Ataque)

Os submarinos de ataque diesel-elétricos hoje vendidos a nações em desenvolvimento são menores e menos velozes que os nucleares (tais como a classe Los Angeles abaixo). Apesar disso, representam uma ameaça significativa ao comércio marítimo e às forças navais com interesse em intervir em conflitos regionais.

	Comprimento (metros)	Velocidade (nós)	Profundidade (metros)
Los Angeles (EUA)	110	30	450
Agosta (França)	69	20.5	300
Kilo (Russia)	73	25	Não Disponível
Tipo 209 Alemanha	64	22.5	Não Disponível
Upholder (Reino Unido)	70	20	>250
VästerGötlar (Suécia)	49	20	>300
Zeeleeuw (Holanda)	66	21	300

Figura 3 – Adaptado de Reville e Lumpe (1994): os submarinos à venda para o 3º. Mundo em comparação à classe Los Angeles (grande submarino nuclear)

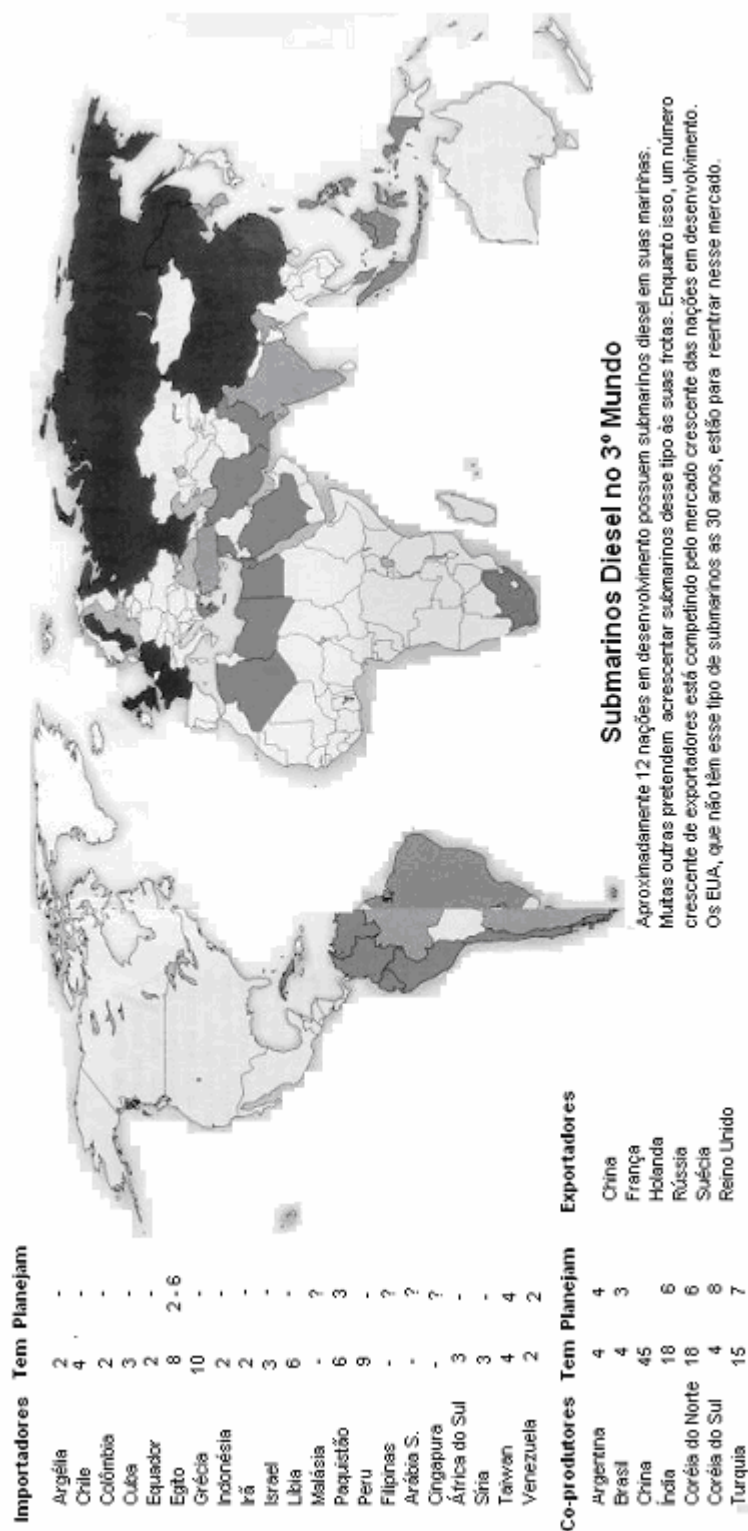


Figura 4 - Países Produtores e Importadores (adaptado de *Strategic Studies* apud Revelle e Lumpe, 1994)

O patrulha submersível, por se tratar também de um veículo de formas não convencionais, merece um estudo especial quanto à segurança à navegação tanto submersas quanto na superfície, e a tese apresenta um método racional capaz de extrapolar os critérios existentes a fim de prover segurança encontrado na seção 6.

Em outra vertente de estudo, o trabalho retoma a linha de pesquisa analítico empírica (a partir de geometrias idealizadas) e prevê formas rápidas para previsão da manobra nos estados iniciais de projeto, a partir de fórmulas que permitam o cálculo dos esforços hidrodinâmicos.

O desenvolvimento da manobra nos últimos anos, ao contrário, vem se concentrando no aperfeiçoamento de modelos de CFD que descrevam o escoamento com perfeição permitindo o dimensionamento completo (incluindo apêndices) e otimização do casco.

Como se depreende do relatório da Marnet (2003), a vantagem dos modelos analítico-empíricos encontra-se em que o CFD:

- (i) Não permite a utilização *por* qualquer usuário, pois depende de *softwares* específicos;
- (ii) Depende de peritos em CFD para *lidar* com malhas;
- (iii) Depende de *hardwares* nem sempre disponíveis;
- (iv) Depende de validação de alguns dos programas em uso;

Isso explica que vale a pena investir para simplificação do problema.

Como se trata de uma embarcação nova, propõe-se um novo critério de manobra que, além da justaposição dos critérios de navios e submarinos, apresenta uma base racional de orientação no sentido de criação de um critério homogêneo: a segurança em função da detecção.

Finalmente, o trabalho apresenta o método de classificação de navios a partir da DEA. Com ela os navios podem ser classificados, e funções de mérito permitem avaliar quais as melhores decisões (*trade-offs*) projeto.

1.1.3 METODOLOGIA

Segundo Thiollent e Feitosa (2002) podem-se aproveitar os seguintes tipos de métodos científicos:

- (i) observação;
- (ii) experimentação;
- (iii) projeção (projeto);

- (iv) pesquisa-ação;
- (v) avaliação.

Entende-se que a melhor forma de verificar a viabilidade de uma concepção é efetivamente fazer-se um projeto de concepção. O mero projeto, entretanto, não quantifica qual o grau de efetividade do tal meio, o que se consegue com emprego de ferramentas de análise consagradas.

Formas assimétricas quando submersas têm comportamento diferente das convencionais, o que faz que o problema de manobra assuma relevância, pois nesse caso há uma assimetria vertical e uma metodologia própria é adotada também nesse subproblema.

1.1.3.1 METODOLOGIA PARA O PROJETO DA EMBARCAÇÃO

Uma série de configurações de embarcações são estudadas para a solução dos problemas propostos. O processo investigativo obedece às seguintes etapas:

- (i) Caracterização do ambiente em que essa embarcação vai operar. A princípio, este ambiente é a costa, que será melhor definida com base na legislação internacional.
- (ii) Determinação das funções do veículo. Essa embarcação deve atender ao maior número possível de funções de um submarino e de um navio patrulha. Por tanto, nesse caso, expõem-se ambos os conjuntos e forma-se um novo, aquele das funções previstas para o patrulha em estudo;
- (iii) A maior parte dos requisitos de eficiência dos navios de guerra, em geral, não é publicada por razões de sigilo. Utiliza-se, então, um processo de análise de dados para obtenção desses valores, a partir de publicações ostensivas, como o *Jane's Fighting Ships*, 1996;
- (iv) Para descobrir o *trade off* entre as várias variáveis de projeto, ou seja, velocidade, autonomia, tripulação, faz-se uso de duas ferramentas básicas, a regressão e a análise envoltória de dados (DEA) do inglês, *data envelopment analysis* (FARRELL, 1957);
- (v) Determinação da melhor forma hidrodinâmica, com as alternativas esboçadas através de um mapa morfológico (CROSS, 1989);
- (vi) As degradações sofridas são medidas através da análise envoltória de dados que permite atribuir uma nota de desempenho ao projeto.

- (vii) A formulação de critérios para análise das características da manobra desse tipo de embarcação.

O projeto com foco na solução (*solution focused design*, SFD) de criação de Schachter (2002 e 2004), propõe uma metodologia própria de solução de problemas relacionados à concepção de produtos (problemas conhecidos como mal-definidos, *ill-defined*). No caso, para as condições (i), (ii) e (iii) faz-se uma análise de documentação (pesquisa-ação) disponível em revistas técnicas dos mais variados ramos do conhecimento: estratégia, tática, política marítima, revistas de equipamentos militares, oceanografia associada ao litoral e fenômenos associados à propagação do som e ondas eletromagnéticas. Tal pesquisa instrui o *brainstorming* com foco no problema a ser resolvido, ou seja, na lacuna estratégico-tática existente na defesa da costa.

Para melhor compreensão da abordagem SFD, Schachter (2002 e 2004) propõe o mapa comparativo a seguir.

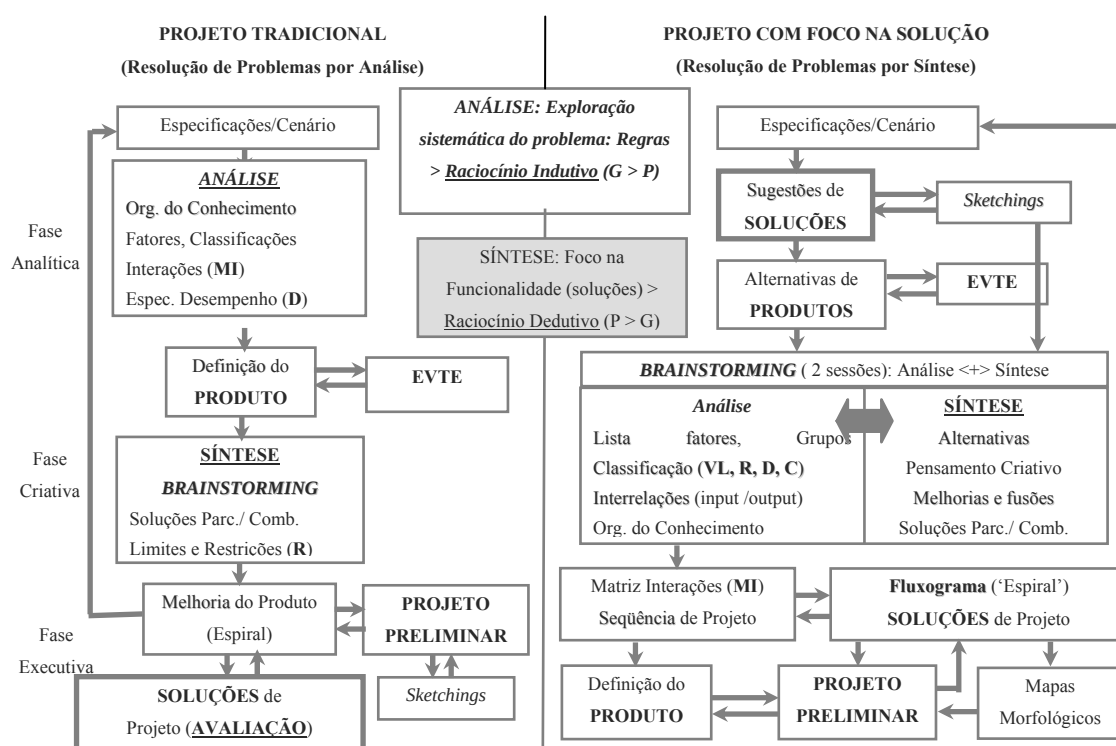


Figura 5 – SFD, onde EVTE significa estudo de viabilidade técnico econômica, VL, variável livre, R, restrição, D, fator de desempenho e C, configurações.

Entende-se que a melhor forma de verificar a viabilidade de uma concepção é efetivamente fazer um projeto preliminar. Nesse caso, o método científico utilizado é o próprio projeto, que será comparado com outros de forma a quantificar sua validade. Para tanto, utiliza-se a DEA aplicada à avaliação de navios militares (BOGOSIAN

NETO e PESSE, 2004) que é um instrumento relativamente recente (FARRELL, 1957) capaz de atribuir notas a um conjunto de dados que apresentam certas características.

Para o projeto conceutivo das várias possíveis embarcações, estimam-se valores iniciais capazes de garantir a viabilidade em nível conceitual do projeto e que possibilitam um refinamento posterior. Não devem ser estranhadas pequenas variações em torno de valores como comprimento na ordem de 5%, peso na ordem de 10 % e mesmo valores de potência sensivelmente diferentes, mas necessários para se prosseguir no processo de projeto. Pelas mesmas razões, ao contrário, devem ser admirados os acertos quanto a parâmetros que de fato não têm uma estimativa preliminar racional.

1.1.3.2 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE EMBARCAÇÕES

A literatura oferece uma série de critérios para avaliação de embarcações. O método ora adotado compreende a aplicação de uma ferramenta de análise consagrada (DEA) e a escolha dos parâmetros que devam ser pontuados, procurando minimizar a subjetividade.

1.1.3.3 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DA MANOBRA

Primeiramente, faz-se o desenvolvimento do modelo matemático do movimento.

Linearizam-se as equações e desacoplam-se os graus e liberdade de forma a tratar o problema de forma independente no plano vertical e horizontal. Discutem-se, então, os critérios de estabilidade direcional no plano horizontal na superfície e na condição submersa, e a estabilidade vertical.

A diferença entre o plano horizontal na condição submersa e na superfície acaba por residir na assimetria do veículo e com influência nas hipóteses que permitem o cálculo das forças envolvidas na manobra, fazendo-se necessária a proposição de métodos que se adaptem às particularidades dessa concepção.

Opta-se pelo cálculo teórico das derivadas a partir de geometrias idealizadas, usando-se, também, o ferramental do método da malha de vórtices de forma a se apoiar os refinamentos propostos.

Comparam-se as muitas das metodologias de cálculo dessas derivadas, nos planos horizontal e vertical e termina-se com o caso do híbrido de uma versão, a V2A.

Propõe-se um critério de manobra para esta versão, com base nos critérios existentes. Finalmente, verifica-se o atendimento a esse critério.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresentam-se nessa revisão bibliográfica, além dos veículos que pretendem preencher lacunas estratégico-tático navais (Recent NPS ... , 2002), outros veículos que representam as perspectivas de concepções futuras de projeto. Também fazem parte da revisão os outros dois temas abordados pela tese: a análise de dados DEA (classificação e otimização de navios) e a manobra do submersível.

Os projetos de veículos militares têm apontado no sentido do crescimento do deslocamento em virtude de problemas afetos principalmente ao cumprimento de sua missão em mares de grande energia (RUDKO, 2003).

Crescer em deslocamento significa crescer em custo. Ao contrário, a perspectiva desse trabalho pretende minimizar o deslocamento e, portanto, reduzir custo.

Muitos dos veículos propostos para preenchimento dessas lacunas podem ser entendidos como aviões, tripulados ou não, que envolvem elevado grau de sofisticação. Nesse caso, o novo submersível concorda com as tendências mais modernas procurando sempre incorporar soluções viáveis de sistemas que estejam o mais próximo possível do estado da arte em tecnologia.

2.1.1 VEÍCULOS MILITARES E CIVIS NÃO CONVENCIONAIS

2.1.1.1 LITTORAL COMBAT SHIP

Em face do novo conceito de marinhas de águas marrons (JOERGENSEN, 1998), soluções paralelas à apresentada nessa obra são desenvolvidas por algumas marinhas, entre elas, a marinha americana que apresenta o conceito de uma família de classes de navios, DD(X). Essa família de classes compreende grandes navios (com deslocamento acima de 12000 t) e outros menores como o LCS (Littoral Combat Ship).

O LCS é definido como um meio rápido, pequeno e barato “*small, fast, affordable ship*” (What is LCS?, 2004). Suas principais características são a velocidade e agilidade, capaz de operar a baixas velocidades para operações no litoral, mas sendo igualmente capaz de interceptar e navegar em velocidades econômicas.

A Lockheed Martin propõe a criação do Littoral Combat Ship (DD(X) Program Description). Esse navio é similar ao LCS proposto por suas concorrentes (Raytheon e

General Dynamics) no que se refere a proporções. O deslocamento dessa embarcação apresenta muitas variações. Na Tabela 1, encontram-se algumas de suas características:

Tabela 1- Características dos LCS

L	115 m
B	>13 m
T	<4 m
Δ	< 3000 t
V	45 ~ 48 nós
Vel. Interceptação	55 nós
Propulsão	CODAG/hidrojato
Hangar	2 MH-60S, 3 VTUAVs
Trip	< 50
Casco	Semiplaneio em aço

Fonte: <http://www.lmcsteam.com/solutions.html>, ac. 17/02/05

Sobre a classe LCS, podem ser encontradas diferentes informações:

Tabela 2 – Características do LCS

Deslocamento	500 t	600 t
Calado	9 m	4.5 m
Velocidade de Interceptação	40 nós, mar 3	50 nós, mar 3
Raio de Ação	1000 milhas (40 nós), 3500 milhas, 18 nós	1500 milhas (40 nós), 4300 milhas, 20 nós
Suporte aéreo	1 MH-60R/S e VTUAVs	1 MH-60R/S e VTUAVs
Autonomia	14 dias	21 dias
tripulação	50	15
Acomodações	75	75
Disponibilidade	0.85	0.95
Vida Útil	20 anos	30 anos

Fonte: <http://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/lcs-program.htm>, ac. 17/02/05



Figura 6 - Multifuncional da Lockheed Martin (DD(X)) para operações na zona costeira.
(<http://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/lcs-pics.htm>, ac. 17/02/05)



Figura 7 – Multifuncional para operações na zona costeira, proposto pela General Dynamics
(<http://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/lcs-pics.htm>, ac. 17/02/05)

Ao contrário do patrulha submersível e no mesmo sentido de Rudko (2003), essa empresa e suas concorrentes preferem investir em veículos de superfície, apresentando soluções que satisfazem bem a grandes marinhas, como a americana. Tais navios devem ser construídos e operar num futuro próximo (2005, segundo DD(X) CLASS..., 2004).

Apenas para reforçar a mesma idéia, seguem-se as versões propostas pela Raytheon e pela General Dynamics.

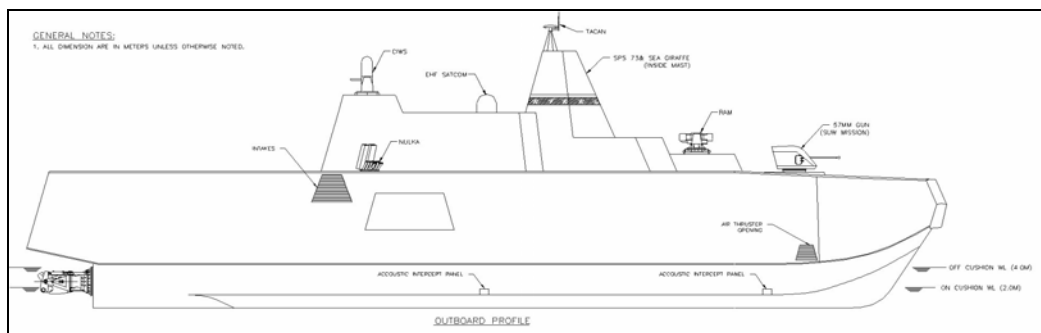


Figura 8 - Multifuncional para operações na zona costeira proposto pela Raytheon
(<http://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/lcs-pics.htm>, ac. 17/02/05)

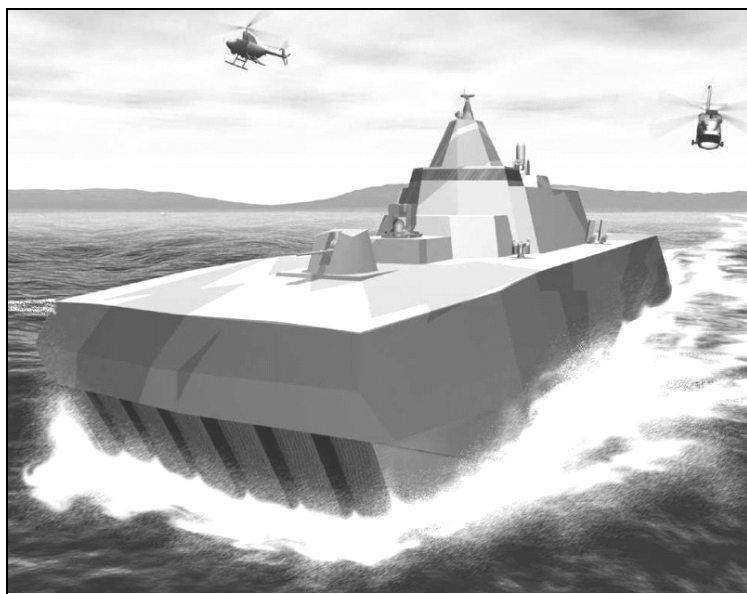


Figura 9 - Visão renderizada do veículo da Raytheon
(<http://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/lcs-pics.htm>, ac. 17/02/05)

Essa solução da Lockheed Martin e de suas concorrentes mostram bem que o patrulha submersível é de fato uma alternativa original, pois caminha num outro sentido.

A Marinha Americana (Lockheed Martin) apresenta ainda a necessidade de uma segunda classe de navios, maior ainda que os precedentes, de modo a apoiar as forças de desembarque em terra:

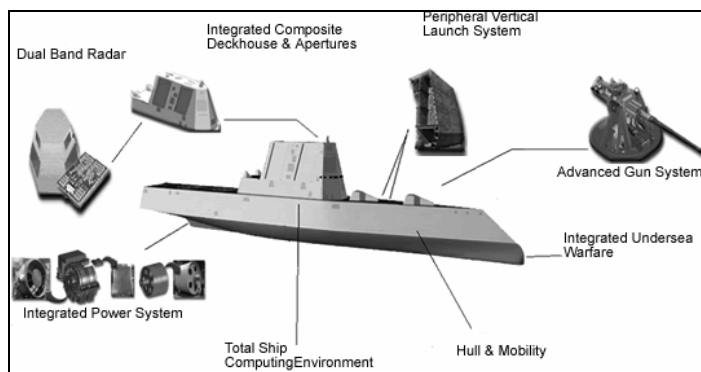


Figura 10 - DD(X) e alguns de seus sistemas, <http://peoships.crane.navy.mil/ddx/>, ac. 17/02/05

É notório que entre as condicionantes que os LCS/DD(X) pretendem satisfazer não se encontram as de caráter econômico, pois são navios de grande deslocamento, portanto grande custo operacional, e que dificilmente satisfariam aos países que não apresentam boa capacidade financeira.

2.1.1.2 VIPER TILT ROTOR ESCORT AIRCRAFT

A Naval Postgraduate School, um respeitado centro de pesquisa da Marinha Americana, apresenta um conjunto de possibilidades de defesa desse século (Recent NPS ... , 2002). Nesse sentido, o avião da figura 11 é um novo tipo de aeronave embarcada, cujas principais vantagens se referem principalmente à autonomia.

Menos do que uma alternativa ao patrulha submersível situa-se mais no campo de suas futuras ameaças.

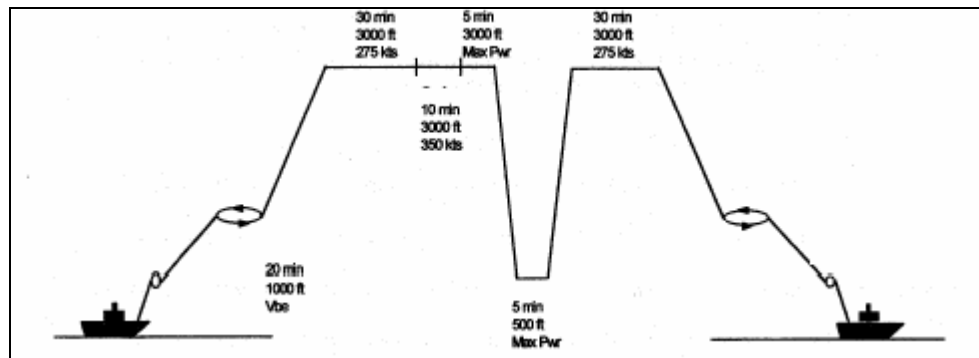


Figura 11 - Perfil de operação da nova aeronave embarcada (Recent NPS..., 2002)

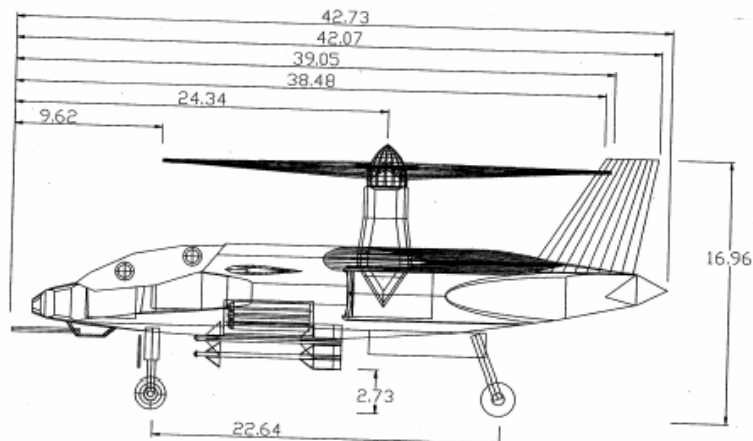


Figura 12 - Esquemático do Viper Tilt Rotor Escort Aircraft (Recent NPS..., 2002)

2.1.1.3 SEA SPECTRUM SURVEILLANCE UNMANNED AERIAL VEHICLE (SSSUA)

O SSSUA também se localiza mais no perfil de uma possível ameaça do que propriamente uma alternativa ao preenchimento da lacuna tática que o patrulha submersível pretende satisfazer. Seu aparecimento nesse trabalho é no sentido de mostrar quais as inovações que se prevêem utilizar no restante desse século.

Esse veículo serve para reconhecimento e parte de aeronaves embarcadas nas alturas indicadas na figura 13, onde os trapézios inferiores são as embarcações e também aparecem a altura de vôo e a velocidade de operação.

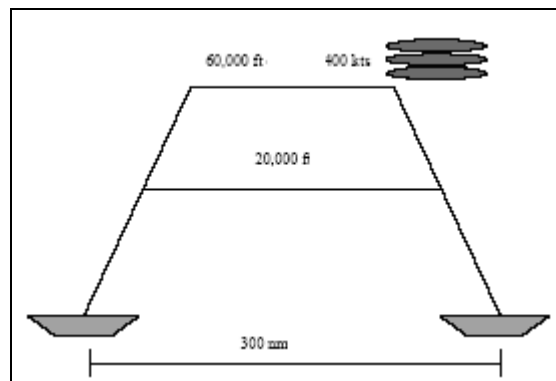


Figura 13 - Perfil de operação do drone embarcado (Recent NPS..., 2002)

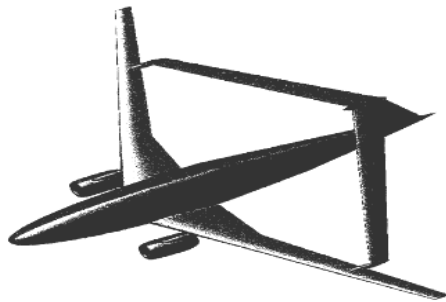


Figura 14 - Vista de perfil do drone para vigilância marítima (Recent NPS..., 2002)

2.1.1.4 SEA ARROW ARMED RECONNAISSANCE UNMANNED AERIAL VEHICLE (SAARUAV)

Além do reconhecimento, o SAARUAV apresenta a capacidade de dar combate a outras embarcações, ou seja, de forma alguma se encontra no campo das alternativas do patrulha submersível, no entanto, faz parte, com certeza das suas ameaças.

Trata-se de um veículo que além do reconhecimento efetua ataques a alvos no mar, como fica ilustrado na figura 15.

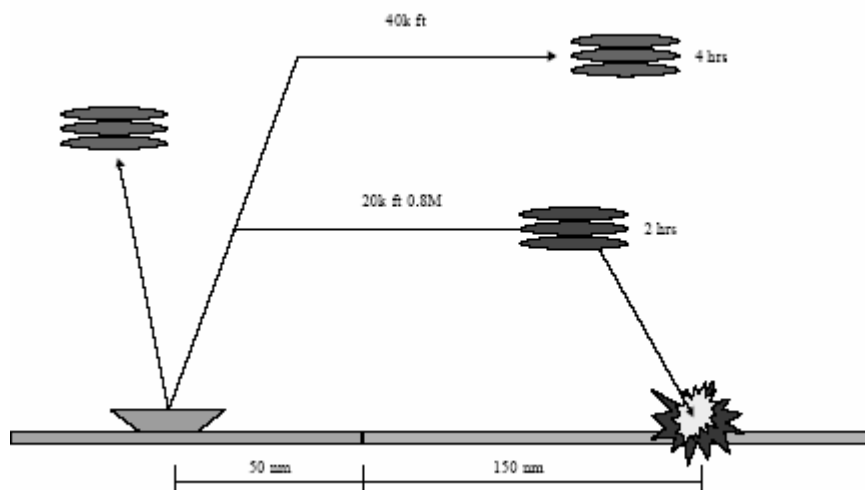


Figura 15 - Perfil de operação do drone embarcado e armado(Recent NPS..., 2002)

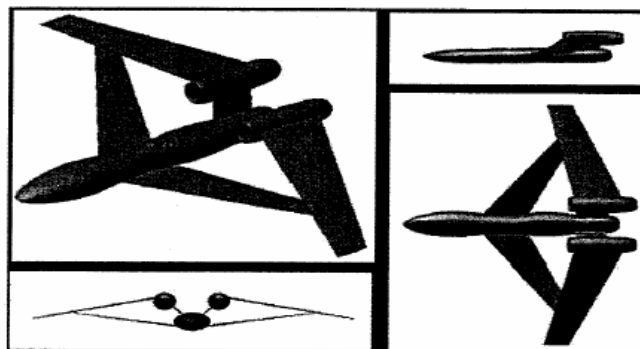


Figura 16 - Possibilidade 1 do veículo (Recent NPS...,2002)

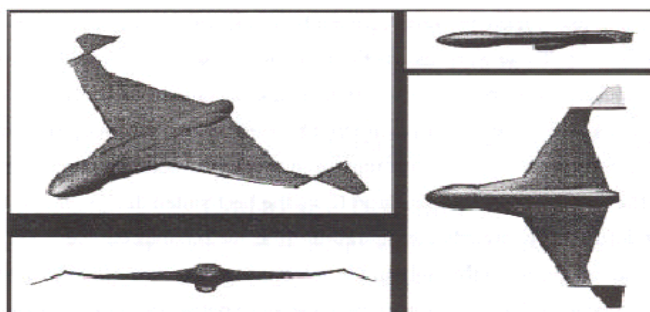


Figura 17 - - Possibilidade2 do veículo (Recent NPS...,2002)

2.1.1.5 MARITIME PREPOSITIONING FORCE SHIP 2010

O veículo a seguir é efetivamente inviável para países sem recursos financeiros. Mesmo as grandes potências não justificam seus gastos com embarcações dessa natureza. Seu valor justifica-se nas doutrinas que prevêm a projeção do poder sobre terra e, contra esse tipo de navio é que a arma submarina ganha realce.

A apresentação desse navio, serve para ratificar a imagem de que o caminho que vem sendo seguido pelas potências é a criação de navios cada vez maiores. Na Figura 18 a embarcação aparece lançando aeronaves e desembarcando fuzileiros navais via um hovercraft militar.

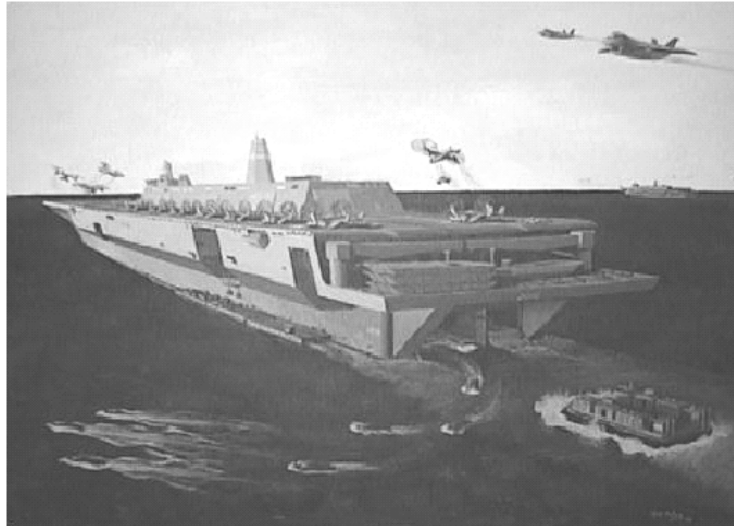


Figura 18 - Versão da NPS para a guerra em águas marrons, adaptado de Recent NPS Engineering Designs Applicable to the Expeditionary Warfare project (2002)

2.1.1.6 SEA LANCE LITTORAL WARFARE SMALL COMBATANT SYSTEM

O veículo apresentado na figura 19 tem função também de transporte de fuzileiros navais, outra vez é bem maior que o previsto para o submersível, mas continua sendo multifuncional.

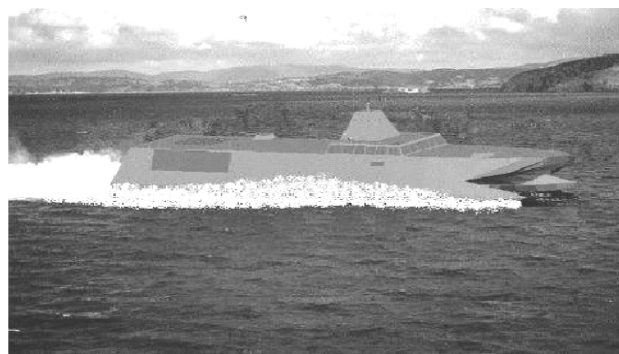


Figura 19 – Adaptado de Recent NPS Engineering Designs Applicable to the Expeditionary Warfare project (2002)

2.1.1.7 VEÍCULOS NÃO-CONVENCIONAIS JÁ CONSTRUÍDOS

Algumas alternativas estão sendo testadas para os novos cenários de guerra no mar, como por exemplo, as fragatas trimarãs e o Seashadow americano.



Figura 20 - Fragata Trimarã



Figura 21 – Seashadow: SWATH de combate Stealth

O primeiro trata-se de uma fragata com três cascos, ou seja, com área de convés superior às suas equivalentes monocasco², e o segundo um SWATH com formas de difícil detecção por parte dos radares. Pode-se dizer que o *Seashadow* encontra-se na mesma filosofia de projeto do patrulha submersível.

2.1.1.8 SUBMERSÍVEIS NÃO-CONVENCIONAIS

Aqui se apresentam os submersíveis civis não convencionais para traçar um perfil do estado da arte de projetos não convencionais.

² a palavra monocasco é aqui empregada diferentemente das demais vezes nesse trabalho em que quase sempre se refere à existência de apenas um casco resistente à pressão, seguindo a nomenclatura dos submarinos como em Turrini e Miozzi (1999).

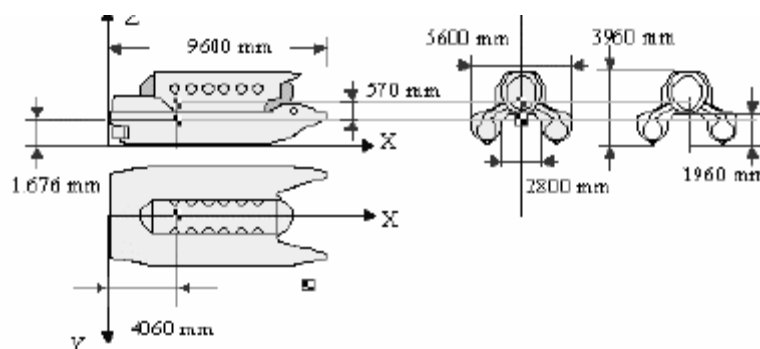


Figura 22 –SWATH submersível. Fonte: IBARZ, LAMAS e PEÑA, 2003

De interessante, tem-se que há muitos submersíveis usados na pesquisa e turismo. Merecem destaque especial o submersível de Ibarz, Lamas e Peña, (2003), pois são três cascos em forma de SWATH capaz de submergir completamente, vide Figura 22.

Muitos são os submarinos que atualmente servem a funções turísticas, como o que aparece nas Figuras 23 e 24, em geral apresentando autonomia de algumas horas somente.

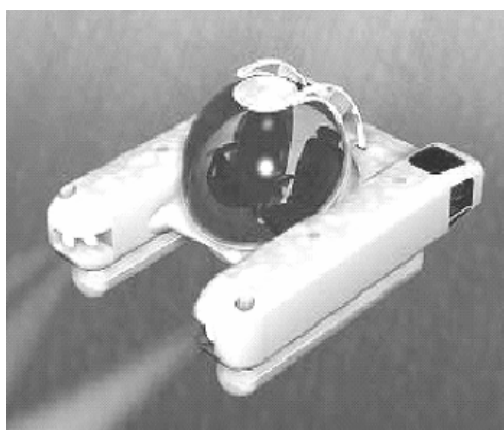


Figura 23 - Submersível não-convencional de turismo (dois lugares) - (Small Submarines & Submersibles. U. S. Submarines Inc., 2002)



Figura 24 - Submersível não-convencional de turismo Triton 650 - (Small Submarines & Submersibles. U. S. Submarines Inc., 2002)

Um destaque por sua propulsão é o submersível de Hawkes que utiliza seus hidroplanos para locomoção, aparentemente de forma semelhante ao planador de

Canhetti (2001). Essa solução foi analisada sucintamente no *brainstorming* do projeto do patrulha submersível, mas posteriormente abandonada, por economia de energia.



Figura 25 - HAWKES, GRAHAM . Deep Flight Aviator (<http://www.deepflight.com>, ac. 17/02/05)

Já o *Discovery* (Figura 26) é um submersível turístico que tem o casco resistente à pressão em GRP (*glass reinforced plastic*), capaz de submergir a 300m, e por isso ganha destaque, entretanto, não é inovador nas formas de seu casco.



Figura 26 – *Discovery* -submersível de turismo com casco em GRP, profundidade de 300m (Small Submarines & Submersibles. U. S. Submarines Inc., 2002)

2.2 REVISÃO DE MEDIDAS DE EFICIÊNCIAS DO NAVIO

É usual medir-se o desempenho de navios. De forma resumida, podem-se admitir duas escolas de medida de eficiência: a americana e a russa.

Os americanos desenvolveram o OMOE (overall measure of effectiveness), um coeficiente que serve para saber o quanto o navio atende ao que se pretende idealmente dele.

Os russos fazem uso do que se chama análise militar e econômica, exemplificada com respeito a submarinos em Kormilitsin e Khalizev (2001).

2.2.1 ESCOLA AMERICANA

A escola americana tem base em três conceitos diferentes de medida: eficácia, (*Measures of Effectiveness*, MOE); desempenho, (*Measure of Performance*, MOP); medida global de eficiência (*Overall Measure of Effectiveness*, OMOE). (*Effectiveness Estimating*, 2003)

O primeiro desses conceitos (MOE) refere-se à habilidade de um sistema em cumprir seus requisitos de projeto (SAUNDERS, TYNDALL e WHITEHOUSE, 2000), no caso de navios os requisitos do armador ou do Estado Maior.

Tratam-se de medidas relativas ao ambiente operacional (GREEN e JOHNSON, 2002), enfim, são critérios que partindo de uma formulação que determinam o quanto o navio se aproxima do esperado, por exemplo, a capacidade de um grupo-tarefa (*battle group*) de navegar em cruzeiro de guerra. (*Effectiveness Estimating*, 2003)

O segundo liga-se ao projeto em si: são as configurações e características do navio: autonomia, raio de ação, velocidade, número de canhões, etc, totalmente independentes do cenário da missão (MIERZWICKI, 2003).

Saunders, Tyndall e Whitehouse (2000) orientam ser útil pensar em termos de hierarquia de sistemas, a fim de evitar confusões entre os termos MOP e MOE. Os MOPs podem ser obtidos isoladamente, enquanto que os MOEs não podem ser determinados a menos que os requisitos dos sistemas maiores que são por eles suportados tenham sido especificados.

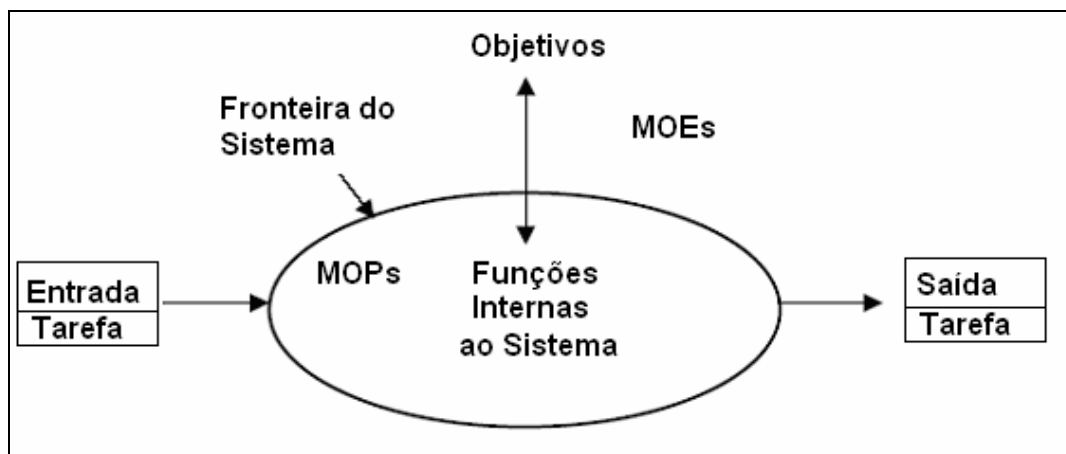


Figura 27 - MOE e MOP (Adaptado de SAUNDERS, TYNDALL e WHITEHOUSE, 2000)

O termo OMOE refere-se à composição sistema e ambiente circundantes, ou seja, a composição MOE e MOP, como explicado na referência *Effectiveness Estimating* (2003).

Costumam-se estimar as MOP e MOE e, portanto, as OMOE, com o uso de ferramentas multi-critério, na falta de modelos mais precisos (MIEZWICKI, 2003). Estas técnicas podem ser usadas tanto para capturar as preferências dos projetistas e dos armadores, como para promover análises posteriores ao próprio projeto (Saunders, Tyndall e Whitehouse, 2000). O gráfico a seguir ilustra essas ferramentas.

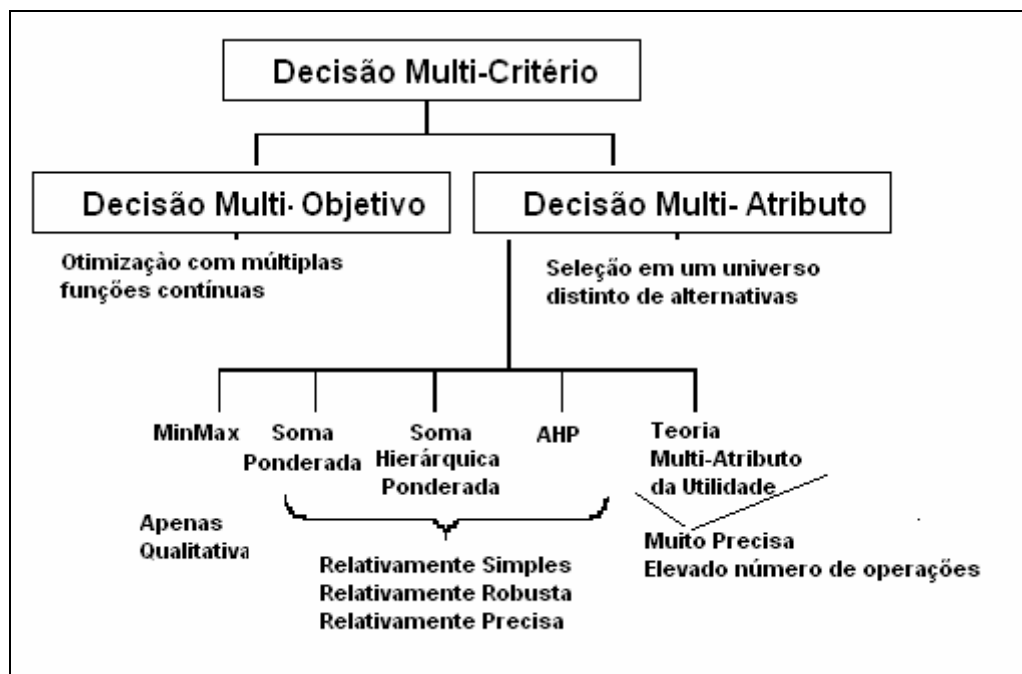


Figura 28 - Ferramentas Multicritério (Adaptado de Effectiveness Estimating , 2003)

A subjetividade é inerente aos métodos MCDA (Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão, *Multicriteria Decision Making*) que abrangem o AHP (*Analytical*

Hierarchical Process), a técnica de decisão multicritério mais popular (SAUNDERS, TYNDALL E WHITEHOUSE, 2000).

O AHP fundamenta-se na comparação dos diversos critérios/alternativas, dois a dois de acordo com uma escala de julgamento previamente arbitrada.

No AHP as informações são arranjadas em uma árvore hierárquica. O exemplo a seguir ilustra o procedimento (*Effectiveness Estimating*, 2003). A célula Navio é o resultado final da medida OMOE.

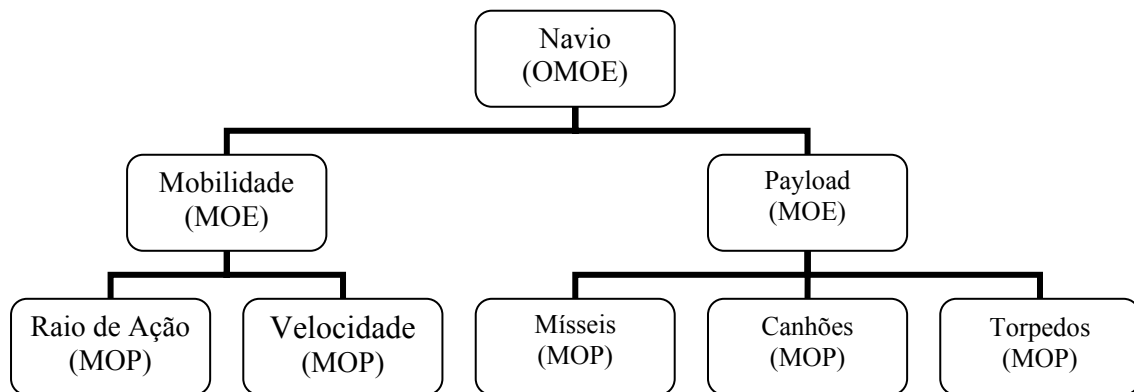


Figura 29 – Adaptado de Effectiveness Estimating (2003)

A média final do navio nas suas OMOE é calculada por:

$$OMOE = \sum_j P_j x_j \quad (1)$$

onde P_j é o peso da MOP j e x_j é o valor do MOP j .

O método se divide em duas etapas. Na primeira, independentemente de qualquer navio, estimam-se quais seriam as MOPs (ou seja, parâmetros físicos e estruturais) necessárias à consecução das MOEs, duas a duas. No caso em questão, para payload, por exemplo, comparar-se-ia torpedos e mísseis, torpedos e canhões e finalmente mísseis e canhões. Formar-se-ia uma matriz de comparações cujo autovetor representa a importância relativa de cada critério em relação aos demais.

A Tabela 3 é ilustrativa da Matriz de Comparações que representa em cada célula a importância relativa que os avaliadores dão em cada comparação de parâmetros efetuada dois a dois. Essa matriz para ser coerente deve apresentar em células equidistantes da diagonal principal números recíprocos.

Tabela 3- Matriz de Comparações

MOBILIDADE	Raio de Ação	Velocidade
Raio de Ação	1/1	2/1
Velocidade	1/2	1/1

Como exemplo de uso das MOP, Brown e Thomas (1998) propõem um modelo de otimização do projeto de navios. A partir delas, se podem obter PVs (*parameter values*) assim entendidos, por esses autores, como soluções técnicas de projeto como, por exemplo, número de eixos, número de conveses etc. Para tanto, associam a utilização de algoritmo genético à medida de eficiência global OMOE com base em AHP. O gráfico a seguir é extraído da mesma referência e ilustra essa utilização.

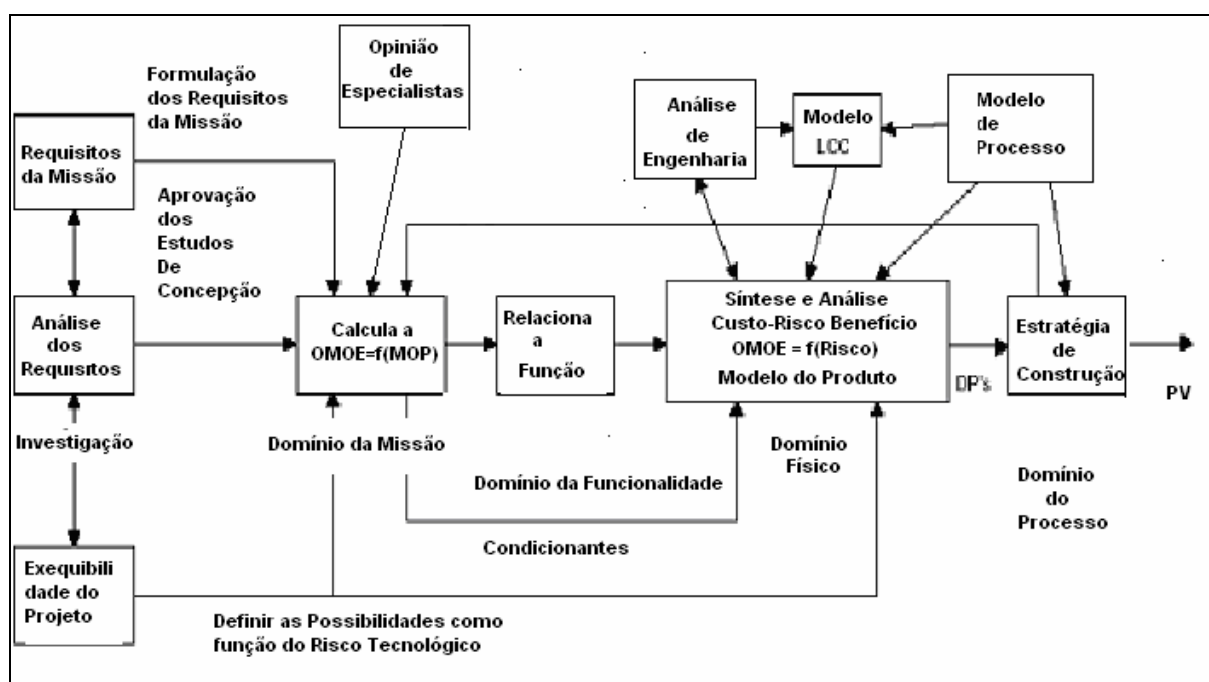


Figura 30 –Adaptado de BROWN e THOMAS, 1998

Nesse exemplo, são parâmetros de entrada (constituintes das MOP): coeficiente prismático (C_p); coeficiente de seção mestra (C_x); razão deslocamento/comprimento; razão boca/calado; razão comprimento/pontal; razão área de conveses; fator de automação; *payload* de AAW; *payload* de TBMD; *payload* ASU; *payload* ASW; área de domínio de tráfego marítimo; ambiente ASW adverso; bom ambiente ASW; capacidade de defesa torpédica; *payload* C4I; *payload* de contramedidas de minagem; *payload* NFSF; *payload* SEW; capacidade das armas de superfície; raio de ação; autonomia; outros.

O aspecto subjetivo entra com a opinião dos especialistas. Note-se que informações como o coeficiente prismático, o coeficiente de seção mestra, as contramedidas de minagem não estão expostas na literatura.

2.2.2 ESCOLA RUSSA

Os russos denominam essa análise custo benefício (que resulta na OMOE) de análise militar e econômica, dividindo-a em duas partes (KORMILITSIN e KHALIZEV, 2001):

- (i) Formulação de um modelo descritivo do navio e de seu emprego;
- (ii) Modelo formal, matemático, que o exprime em expressões analíticas.

Na primeira fase são dados de entrada a área de combate, as características das forças hostis, o modo de combate etc (elementos táticos e técnicos, TTE – *Tactical and Technical Elements*). Na segunda fase, elaboram-se soluções de projeto, ou seja, navios possíveis, TSP (parâmetros técnicos de solução, *Technical Solution Parameters*) e os parâmetros técnicos de tais soluções, ou seja, níveis de assinatura, número de armas e suas características, deslocamento, máxima profundidade de operação (submarinos) etc.

A maior parte da modelagem russa tem base em modelos matemáticos complicados que envolvem estatísticas de capacidades de interceptação, tamanho da força, capacidade de acerto do armamento etc.

Apesar de formalmente eficiente, o modelo russo apresenta uma dependência de parâmetros que além de variáveis no tempo são também variáveis no espaço. Cada vez que se quiser utilizar esse modelo, dever-se-á calibrá-lo em função das condições particulares de cada país.

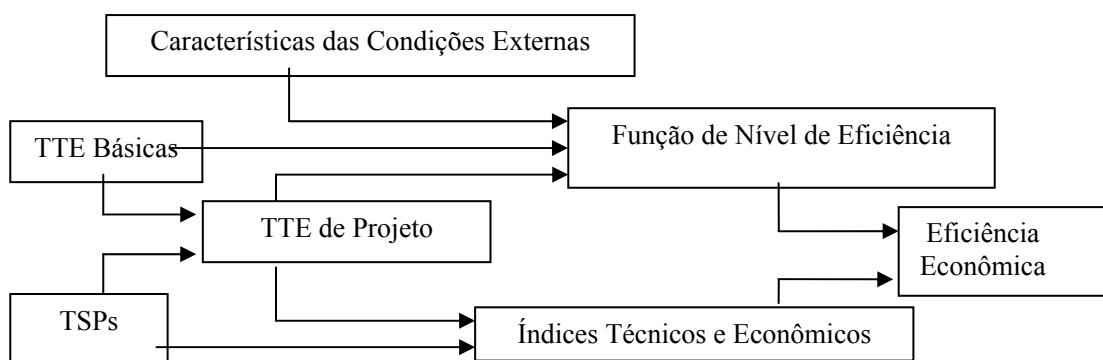


Figura 31 – Adaptado de KORMILITSIN E KHALIZEV , 2001

2.3 REVISÃO DA MANOBRA

A tese aborda a manobra sob dois aspectos. O primeiro refere-se ao cálculo das características de manobra da embarcação. O segundo aspecto refere-se ao critério a ser adotado pelo navio.

Com base no relatório apresentado pela Marnet (2003), nota-se a grande fragilidade em que se encontra a previsão teórica completa da manobra via CFD (que apresenta um nível de confiabilidade igual a 2.4, numa escala que vai de 0 a 4). Nota-se também que essa é a área que concentra os maiores esforços em pesquisas, uma vez que o progresso computacional das últimas décadas tem possibilitado a resolução numérica das muitas equações que regem o comportamento dos corpos total ou parcialmente imersos em fluidos.

Tal esforço foi acompanhado de um certo distanciamento por parte da pesquisa da linha de trabalho anteriormente desenvolvida de obtenção de características de manobra a partir da teoria linear (largamente explicada em Clarke, Gedling e Hine, 1982) e formulações simples a partir de geometrias idealizadas asas como (JONES, 1946) ou teoria de faixas (CLARKE, 1972), embora ainda haja trabalhos recentes nesse sentido como os de Jones et al. (2002) e de Oltmann (2003) entre outros.

Apesar da tendência de abandono das formulações analítico empíricas, são a teoria linear e essas formulações simples quem até hoje ainda alimentam o projeto em suas fases iniciais, porque chegam rapidamente a resultados notavelmente satisfatórios. Nesse sentido, a tese procura somente introduzir pequenas melhorias no cálculo das principais derivadas direcionais dependentes da velocidade (Y_r , Y_v , N_v , N_r , etc).

Quanto ao critério a ser adotado, a tese propõe seu próprio critério, pois até hoje os critérios têm base majoritariamente no histórico dos acidentes marítimos (GOFMAN et al., 1998) e nas características manobreadas das embarcações em uso.

Os critérios atuais tratam do problema sem verificarem as interações do mar e dos homens que conduzem as embarcações, como se o ser humano que participa da manobra não fosse um elemento do sistema navio.

Nota-se, entretanto, a partir do trabalho de Norrbin (1998), que prevê consultas a pilotos, por exemplo, que já se apresenta a preocupação no sentido de se introduzir tais questionamentos. Assim, a tese aprofunda-se no tratamento dessa problemática, pois considera a segurança a ser atingida como a finalidade; e o homem (sua acuidade visual, e a capacidade de reflexão radar), como elementos indispensáveis no processo.

3 CARACTERIZAÇÃO DA MISSÃO E DAS CLASSES DE NAVIOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA MISSÃO

Esse capítulo trata das missões que comumente exercem os navios patrulha e os submarinos e, paralelamente, da missão híbrida capaz de ser exercida pelo patrulha submersível.

As marinhas de guerra do mundo estabelecem as definições de missões e de emprego a partir de uma ciência conhecida como estratégia. A estratégia não se encontra entre as ciências exatas e apesar de não existir nela termos universais, ou seja, termos que tenham significados estabelecidos internacionalmente, há, entretanto, muitos termos que são amplamente conhecidos e aceitos formando um consenso.

Para construir esse consenso, promoveu-se a discussão das características desses navios junto a entrevistas com especialistas do setor de estratégia da Escola de Guerra Naval da Marinha do Brasil, no intuito de fazer definições, em si, mais abrangentes, e nem somente documentais, reunindo a experiências e conceitos de muitas potências internacionais.

O que se buscou de fato foi fugir do conceito de uma embarcação “brasileira”, ou “inglesa”, ou, de forma geral, “nacional” que é o resultado necessário quando se empregam conceitos de estratégia de uma nacionalidade específica.

As características aqui apresentadas são, portanto, mais universais, um denominador comum capaz de garantir as missões em qualquer parte do planeta, sem, no entanto, deteriorar as condições de contorno do desenvolvimento posterior.

3.1.1 TAREFAS DE UMA MARINHA

São quatro as tarefas bélicas de qualquer marinha de guerra (ARAÚJO, 2003):

- (i) Controle de Área Marítima;
- (ii) Projeção de Poder sobre Terra;
- (iii) Negar o uso de Área Marítima sobre a qual não seja possível ou necessário exercer o controle;
- (iv) Fazer-se presente.

A marinha britânica (*Royal Navy, RN*) acrescenta ainda outras tarefas (*The Fundamentals of British Maritime Doctrine*, 1995):

- (i) Comando da área marítima (*Command at Sea*), que é o mesmo que controle da área marítima, mas por tempo indeterminado;
- (ii) Dominância do Campo de Batalha (*Battlespace Dominance*), que necessita da dominância do controle da área marítima;
- (iii) Esquadra em Potência (*Fleet in Being*), que significa evitar o confronto com uma esquadra superior a fim de permanecer ameaçadora, sem sofrer perdas (foi a estratégia alemã na primeira guerra mundial);

A mesma publicação permite uma clara definição das outras tarefas básicas.

Por Controle da Área Marítima (*Sea Control*) entende-se a condição de liberdade de ação para usar o mar, em período e em áreas limitados.

Por projeção do poder sobre terra entende-se poder influenciar os eventos desenvolvidos em terra, via desembarques anfíbios, bombardeios com aeronaves, e operações com forças especiais, como por exemplo colocação de minas ou explosivos.

Finalmente, por Negação do Uso do Mar, entende-se impedir que o inimigo exerça o controle da área marítima e suas funestas consequências.

Cumprem-se essas tarefas por meio da utilização de navios de superfície e submarinos, aeronaves e fuzileiros. Parte fundamental do cumprimento é o planejamento e para possibilitá-lo e facilitá-lo utiliza-se da classificação dos navios, ou seja, seu agrupamento por características semelhantes.

3.1.2 CLASSES DE NAVIOS

Tradicionalmente os navios de guerra são divididos em classes. As classes de navios dividem-nos por suas funcionalidades (missões), por suas dimensões e capacidades.

A classificação dos navios é uma abstração que permite facilitar o planejamento estratégico.

A figura 32 ilustra as classes de navios que hoje servem à Marinha do Brasil. (http://www.mar.mil.br/Marinha_do_Brasil/menu_navios.htm , ac. 17/02/05):

Meios da Esquadra



Meios Distritais



Figura 32- Classes de navios que servem à Marinha do Brasil. Os Navios Distritais têm menores dimensões (adaptação de http://www.mar.mil.br/Marinha_do_Brasil/menu_navios.htm , ac. 17/02/05)

3.1.3 NAVIOS PATRULHA

Historicamente, foi com o advento dos grandes couraçados que, paradoxalmente, surgiram os primeiros navios com função semelhante às atualmente desenvolvidas pelos navios patrulha, muito embora a marinha à vela já conhecesse a canhoneira e a chata que se tratavam de pequenos navios cuja finalidade era destruir outros maiores.

Em 1882, o Alm.^{te} Aube (da Marinha Francesa) escreve o livro *La guerre maritime et les ports militaires de la France*. Nesse livro, o ilustre Almirante dá forma ao pensamento conhecido como “*Jeune École*” (in www.military-photos.com/aube.htm, ac. 17/02/05). Essa doutrina privilegia o uso de embarcações pequenas e baratas, no caso torpedeiras e pequenos submersíveis, contra grandes navios, como os couraçados, mais caros. Os navios patrulha são a continuidade histórica dessa concepção: pequenos navios capazes de destruir navios de grande poder ofensivo.



Figura 33 - Patrulha Típico, Classe Piratini (in ://www.infomarmb.hpg.ig.com.br/piratini.htm, ac. 17/02/05)

Tabela 4 – Características do Piratini

LOA	29 m
BWL	5.8 m
Deslocamento	146 t
Calado	2 m
Velocidade	41 nós
Propulsão	4x 205 kW
Tripulação	15 (2 oficiais)
Raio de Ação	1700 milhas a 12 nós
Canhões	1x 20mm e 2 x 12.7mm

fonte: <http://www.infomarmb.hpg.ig.com.br/piratini.htm>, ac. 17/02/05

Os navios patrulha podem ser usados para o apoio no controle da área marítima, em apoio à projeção do poder sobre terra e em mostrar a bandeira da nação (situação de paz), ou seja, fazer cumprir no mar a lei do país costeiro para as embarcações estrangeiras.

A marinha britânica prevê para o navio patrulha (*patrol vessel*) o emprego em suas águas costeiras, nos países dependentes e na Antártica, na defesa de seus interesses na costa (*offshore*). Isso significa a proteção da pesca, ações anti-terroristas (principalmente na Irlanda do Norte), demonstração da bandeira britânica na Antártica, além de executar serviços hidrográficos e meteorológicos.

Para a marinha portuguesa (*Anuário...*, 2001) são navios de deslocamento entre 200t e 400t com comprimento inferior a 45m destinados a operar junto a zonas costeiras em missões de vigilância, patrulha e defesa.

O termo patrulha (do provençal *patrouiller* pelo francês *patrouiller*) abrange uma vasta categoria de operações. Isso faz com que a característica que una os navios sob a denominação de patrulha seja, de fato, o reduzido deslocamento, e por isso, em

razão de uma gama de diferenças, muitas vezes essas embarcações assumem variadas classificações. Para a Marinha Americana, por exemplo, tem-se o PG-patrol gunboat, PGH-patrol gunboat (*hydrofoil*), PGM-motor gunboat, PT-motor torpedo boat. Como arma antinavio, na 2ª. Guerra Mundial, os americanos criaram os PT Boats um dos quais foi comandado pelo próprio presidente John Fitzgerald Kennedy (PT-109). (in <http://www.ibiblio.org/hyperwar/USN/ships/dafs/abbreviations.html> , ac.:21/02/05)



Figura 34 - Formação em linha dos PT

Tabela 5 - Características dos PT (casco de madeira)

LOA	24 m
BWL	8 m
Deslocamento	56 t
Velocidade	41 nós
Propulsão	3400 kW
Torpedos	2, mais tarde 4
Tripulação	14 (3 oficiais)
Raio de Ação	10000 milhas a 8 nós
Canhões	2x 20mm

Fonte: (Motor Torpedo Boats, 2000)



Figura 35 - Classe Asheville (in <http://www.steelnavy.com/Asheville.htm>, Ac.:17/02/05)

Para a guarda costeira americana (*USCG Boat Crew Seamanship Manual*, 2003) as operações de patrulha são:

- (i) SAR (search and rescue) – busca, resgate e salvamento no mar;
- (ii) Patrulha em regatas e em paradas;
- (iii) Fiscalização de avisos à navegação; *Aids to Navigation Patrols*;
- (iv) Fiscalização Cartográfica (cartas de navegação);
- (v) Patrulha em desastres (furacões, explosões submarinas, alagamentos ou fogo);
- (vi) Segurança portuária e fiscalização de controle da poluição;

Entretanto, como os EUA dividem as funções de policiamento das de fim exclusivamente militar, o que faz com que essa classificação não seja exaustiva. Veja-se a classificação obtida da marinha portuguesa (Vigilância Marítima, 199-?):

A vigilância marítima pode ser definida como uma função operacional de observação realizada nas águas marinhas, que permite dar cumprimento aos diversos objectivos da autoridade marítima, nomeadamente de salvaguarda dos recursos (pesqueiros, turísticos e outros), de protecção ambiental, de segurança interna, de defesa nacional e de cumprimento da lei nas águas sob jurisdição nacional.

As necessidades de patrulha (ou vigilância, para os portugueses) variam muito de um país para outro, com a situação geográfica e o contexto político-econômico, mas exigem investimentos em recursos humanos e materiais. Para garantir a aplicação das regras existentes, a experiência demonstra que

a aparência não é suficiente para deter os possíveis prevaricadores: é necessária uma capacidade genuína para perseguir, parar, abordar e se necessário apreender as embarcações. (Vigilância Marítima, 199-?)

Enfim, a patrulha é uma parte essencial da proteção ambiental das águas e costas, da gestão sustentável dos recursos da Zona Econômica Exclusiva e, portanto, da soberania nacional, donde exige aperfeiçoamentos constantes nos navios a fim de acompanhar o avanço tecnológico. Pode-se estimar a evolução dos navios de guerra e,

especificamente, dos navios patrulha, pela própria evolução destes nos EUA. Os EUA, projetaram as seguintes classes (RUDKO, 2003):

- (i) Asheville - 1960;
- (ii) Pegasus – projeto abandonado 1993;
- (iii) Ciclone – início da construção em 1997;

Tabela 6 - Classe Asheville (Propostas 1 a 5) e Construído , NPa Piratini e Classe Ciclone (RUDKO, 2003). V – velocidade; RA- raio de ação em milhas / V nós e Δ – deslocamento em t.

	LOA [m]	BWL [m]	Calado [m]	Δ [t]	V [nós]	RA [milhas]	Custo [10⁶US\$]
Proposta 1*	29.0	6.0	1.9	107	30	1150/12	1.00
Proposta 2	29.0	6.7	2.0	124	28	600/12	1.20
Proposta 3	35.0	7.4	2.5	210	27	1300/17	1.50
Proposta 4	49.0	7.6	2.1	225	30	1700/16	1.70
Proposta 5	49.0	7.3	2.1	225	30	1700/16	1.90
Construído	50.3	7.3	3.2	240	37	2300/13	3.30
Piratini	29.0	5.8	2.0	146	17	1700/12	?
Ciclone	54.6	7.6	2.6	392	35	?	?

Alimentados pelas mesmas missões, as classes de patrulha da marinha americana experimentaram um crescimento do deslocamento em razão de limitações físicas que obrigaram ao sacrifício da velocidade (*trade off*) por ganhos de raio de ação e armamento e vice-versa. Além disso, em mar agitado, os patrulhas não atingiam a velocidade de projeto (RUDKO, 2003). É digno de nota que o projeto do patrulha submersível também padeceu desses mesmos *trade offs*.

3.1.3.1 TAREFAS DOS PATRULHA

Por sua finalidade, ora de policiamento ora de defesa, o navio deve, portanto, poder realizar as seguintes tarefas:

- (i) destruir ou neutralizar unidades de superfície;
- (ii) defender costa, porto ou área marítima restrita;
- (iii) proteger tráfego marítimo costeiro;
- (iv) transportar equipes destinadas a operações especiais;
- (v) fiscalizar, *lato sensu*, até os confins da ZEE, com as capacidades de parar, abordar e apreender embarcações infratores;
- (vi) mostrar a bandeira de uma nação;
- (vii) executar ações de salvamento.

3.1.3.2 CARACTERÍSTICAS DOS NAVIOS PATRULHA

Caracterizam-se os patrulha por:

- (i) Pequeno calado.
- (ii) Deslocamento menor que 500t (os navios patrulha oceânicos, com deslocamento em torno de 1000t estão fora dessa classificação);
- (iii) Boa velocidade (suficiente para interceptar navios pesqueiros);
- (iv) Pequena silhueta (podem inclusive ser *stealth*);
- (v) Baixo custo de manutenção;
- (vi) Boa manobrabilidade;
- (vii) Raio de ação limitado;
- (viii) Autonomia limitada;
- (ix) Pequena capacidade de defesa antiaérea;
- (x) Comportamento no mar precário;
- (xi) Velocidade afetada pelas condições de mar.

3.1.4 SUBMARINOS

Os submarinos inserem-se no contexto maior da defesa nacional. Nesse sentido, cumprem algumas das tarefas básicas de uma marinha: controle de área marítima, projeção sobre terra e negação do uso do mar.

Para o controle de área marítima são usados complementarmente aos navios e aeronaves. Nesse caso é emprego de duas formas: contra navios (quando há disputa pelo controle) e na proteção contra submarinos.

Para a projeção sobre terra, o submarino é útil como vetor de pequenas incursões e lançador de mísseis nucleares.

Para negar o uso de área marítima pelo adversário, o submarino é arma privilegiada, pois mesmo sem eficiência plena, obriga o inimigo a despender muitos meios (fragatas, corvetas, contratorpedeiros) para sua busca.

Para citar alguns exemplos, segundo o artigo *Submarino de Propulsão Nuclear* (1988), no conflito das Malvinas, a Inglaterra teria enfrentado graves dificuldades se a Argentina dispusesse de uns poucos submarinos modernos que, com a aviação voando do continente, haveriam de criar severa ameaça para os navios-aeródromo e transportes de tropa no teatro próximo às ilhas.

A preponderância inglesa talvez acabasse por prevalecer, pois a Argentina não poderia disputar o controle da área em virtude da ameaça dos submarinos ingleses, mas o patamar de risco e o custo do sucesso teriam sido mais altos.

3.1.4.1 HISTÓRICO DOS SUBMARINOS

Os primeiros veículos capazes de submergir com uso militar apareceram precocemente, com Alexandre Magno, no cerco de Tiros, como relata Aristóteles em 332 a.C. Mais tarde na China, submersíveis primitivos eram movidos pelo atrito com o fundo do mar (200 a.C.)

Em 1624 (GUERRA, 1964), Cornelius Van Drebbel constrói um barco de madeira com remos, capaz de levar 12 tripulantes até uma profundidade de 4.5 metros e raio de ação de 10 km. Em 1775, David Bushnel constrói o Turtle, Figura 36, de emprego militar, usado na guerra de Independência dos EUA. Apresentava de tanques de lastro, hélices para controle vertical, 30 min de permanência submersa e hélices horizontais para profundidade. Além disso, carregava bombas explosivas.

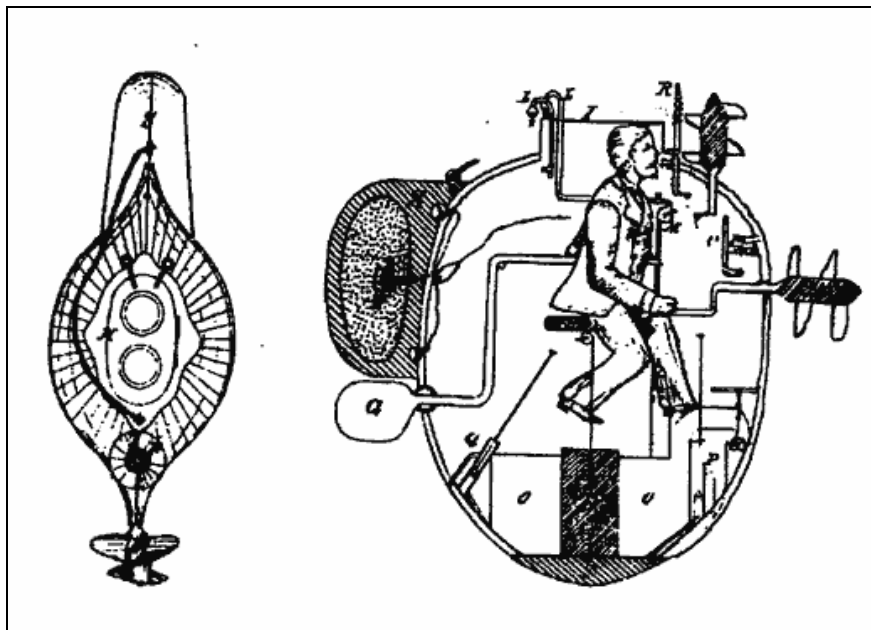


Figura 36 - Turtle , Harris(2002)

Em 1801, Fulton constrói o NAUTILUS (Figura 37): 24 horas de autonomia a 8 metros de profundidade; comprimento de 6.4 m, boca e calado de 1.8 m; profundidade de 8 m; 3 nós de velocidade submersa; 2 nós na superfície; 4 h 20 min de imersão;

Flutuabilidade neutra; esgoto de lastro por bombas; propulsão a hélice e velas; carregava bombas explosivas.

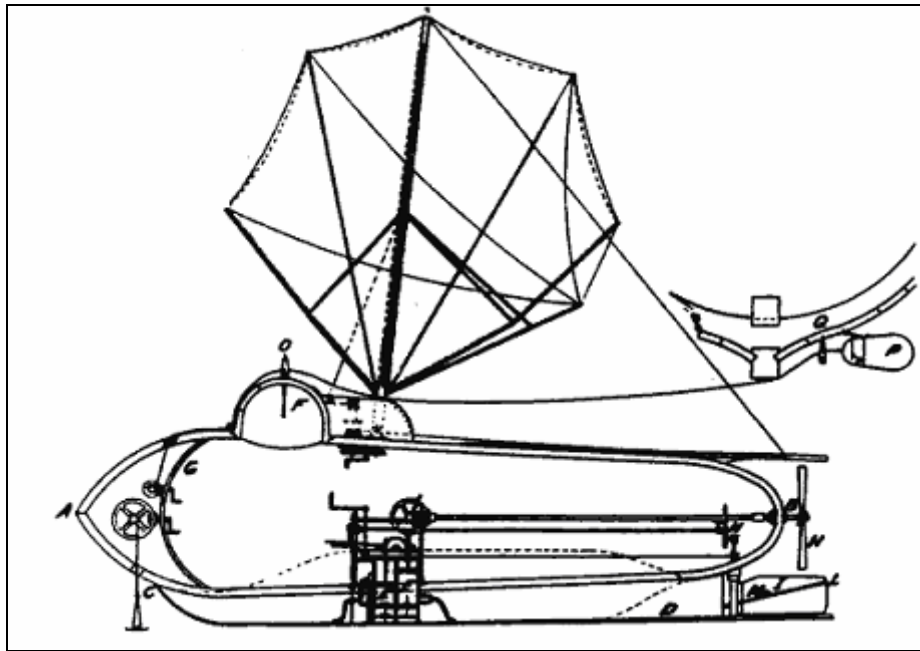


Figura 37 -Nautilus de Fulton, 1801 (HARRIS, 2002)

Em 1850, Bauer criou o BrandTaucher (Figura 38) com 14 tripulantes. Esse submersível realizou 130 mergulhos e naufragou por acidente. Em 1860, o Capitão da Marinha Austríaca Giovanni Luppis projeta o primeiro torpedo, arma que permitiu o submarino se estabilizar como navio de guerra. Em 1864, o CSS HUNLEY (Figura 38) é o primeiro submarino a pôr a pique um navio, o USS Housatonic no Porto de Charleston. No mesmo ano, Narcís Monturiol cria o Ictíneo II.

O Ictíneo II, criado em 1864, na Figura 39, é primeiro submarino com propulsão mecânica, os anteriores tinham propulsão humana, ou pelo vento (como o Nautilus). Sua importância, também se deve ao fato de utilizar peróxido de hidrogênio (água oxigenada) como combustível. Pode-se dizer que seja o primeiro AIP da história (*air independent propulsion*, propulsão independente do ar). Walter, mais tarde, criou o ciclo Walter a base de peróxido de hidrogênio, utilizado no submarino tipo XXI, submarino da 2ª. Guerra. Uma das razões pelo abandono do peróxido de hidrogênio é seu elevado custo operacional, 1000 vezes superior ao dos submarinos de seu tempo (MASON, 1975). O Ictíneo II é raramente citado na cultura anglo-saxônica. Em seu lugar trata-se com detalhes do submarino Holland, de origem americana (1898).

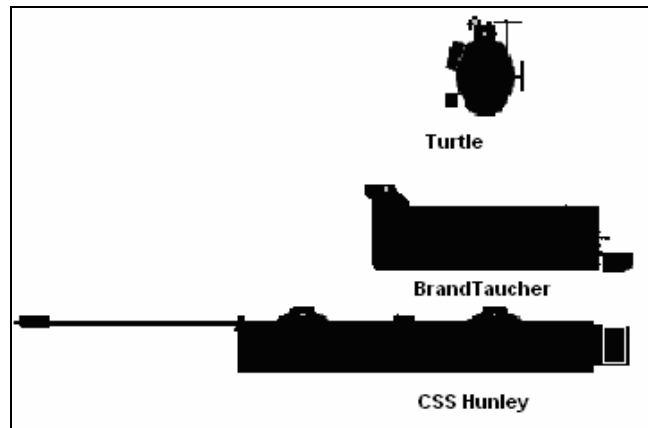


Figura 38 – Na seqüência em tamanho: Turtle BrandTaucher, e CSS Hunley (www.webster-dictionary.org/definition/Submarine).A haste do Hunley tem na ponta explosivos.



Figura 39 - Ictíneo II replica no porto de Barcelona 2003 in http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Ictíneo_II.jpg, Ac.: 18/02/05

Em 1896, é criado o Narval (GUERRA, 1964), na Figura 40: comprimento de 35 m, boca e calado de 3.73 m; 106 t superfície, 200 t submerso; carregava máquina alternativa a vapor e baterias para propulsão submersa. Possuía casco duplo, sendo armado com torpedos. Seu raio de ação era de 242 milhas a 12 nós e 625 milhas a 8 nós. Quando imerso os valores se modificavam para 25 milhas a 8 nós, ou 70 milhas a 5 nós. Possuía, ainda, lemes horizontais para profundidade.

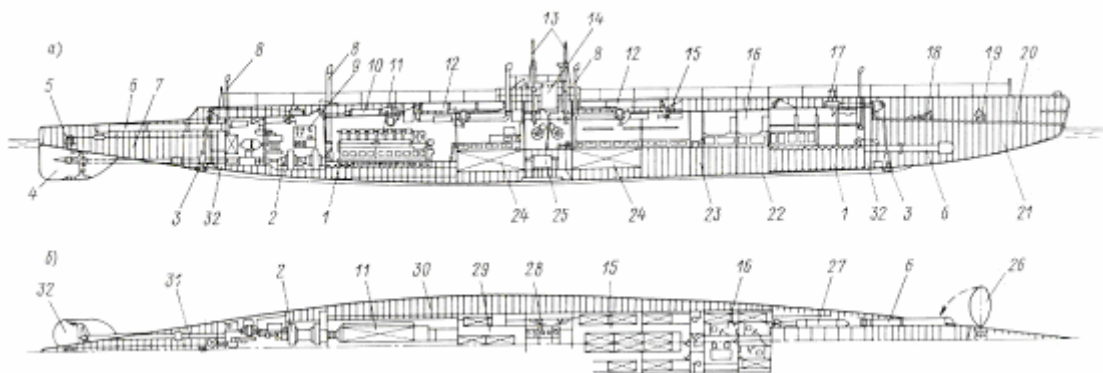


Figura 40–Narval(Fonte: <http://www.gwpda.org/naval/images/narvalholland31aplan.jpg>,Ac.: 18/02/05)

Guerra (1964) observa que as características do Narval se mantêm estáveis e se incorporam aos projetos posteriores. Tendo-se testado muitas possibilidades, as melhores se firmaram, o que permite abstrair que, assim como uma árvore, a tecnologia cresce em vários ramos e um deles acaba constituindo seu cume.

Anteriormente ao período da primeira guerra mundial, a manutenção de uma poderosa esquadra onerava sensivelmente as potências mais fracas, assim o submarino era visto como meio puramente defensivo, a arma por excelência das potências inferiores na defesa de portos e costas (GUERRA, 1964).

Por essa época via-se os veículos submersíveis sob diferentes perspectivas. Nas palavras do almirante alemão Von Tirpitz, 1911, os alemães consideravam o submarino como uma arma em desenvolvimento (apud MASON, 1975). Laubeuf (1918), seu contemporâneo, acreditava, entretanto, na possibilidade de que qualquer veículo militar de pequeno deslocamento, no futuro, pudesse submergir.

Apesar de divergentes em seus posicionamentos quanto às possibilidades e papéis dos veículos submersíveis, cabe registrar que sempre houve muita preocupação das marinhas de superfície quanto ao emprego da arma submarina. Nesse sentido, note-se que a Inglaterra oferece a Robert Fulton, considerável soma para destruir seus projetos (GUERRA, 1964).

Em 22/09/1914, são postos a pique 3 cruzadores pelo pequeno submarino costeiro, U-9, fato que provoca uma mudança na forma de ver o papel dos submersíveis, uma quebra de paradigma. A partir desse momento, o submarino é considerado arma de grande poder ofensivo (GUERRA, 1964). Como consequência, passa-se a exigir imersão rápida, reserva de fluabilidade para aumento da velocidade na superfície e maior deslocamento. A Tabela 7 ilustra o desenvolvimento do período desde o Narval até o UB, todos germânicos. Nela LOx BWLx T representam comprimento, boca e calado, prof, profundidade e Δ , o deslocamento.

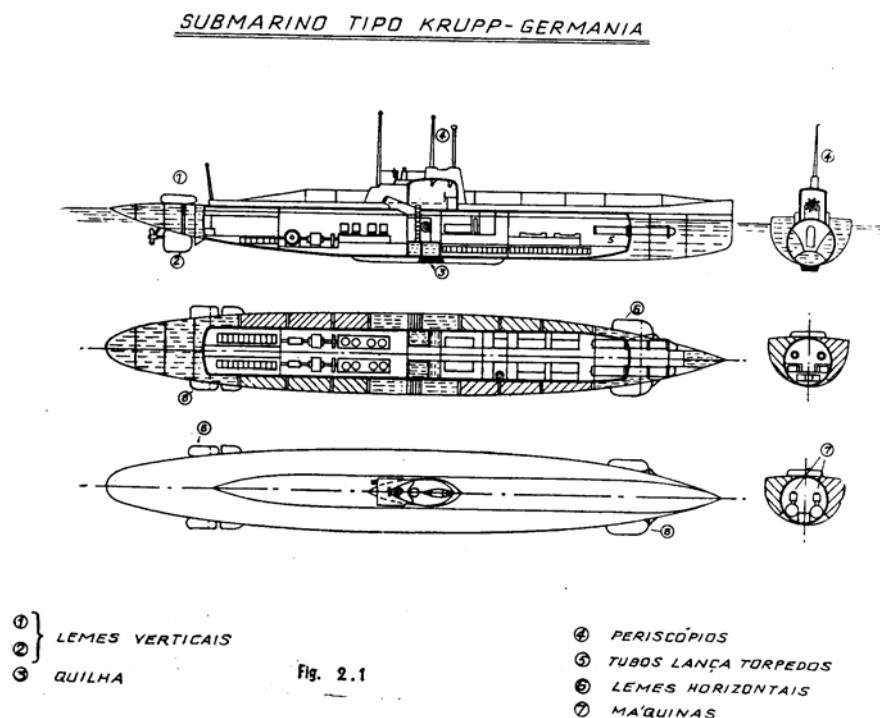


Figura 41 - Submarino Típico do período anterior a 1ª Guerra Mundial. Krupp, (GUERRA, 1964)

Tabela 7 - Dimensões de Submarinos

	LOAxBWLxT [m]	Δ sup/sup [t]	V sup/sub [nós]	BkW Sup/sub (kW)	RA [milhas]	Prof [m]
Narval ¹	35x3.73x3.73	117/202	10	165/60	345/10	
UBOAT ²	64.2x6.1x3.5	660/860	15/9.5	?	1150/12	?
UB ³	34.2x3.45x5.2	128/?	6.5/5.5	89	600/12	?
Tipo II ⁴	42.7x4.08x3.9	284	13/7	322/269	1300/17	150
Tipo VII ⁵	67.1x6.2x4.74	769/871	17.7/7.6	2400/560	13700/10	220
Tipo XXI ⁶	76.6x6.2x6.3	1621/1619	15.6/17.2	4000/4400	15500/10	280
Seehund ⁷	12.16	15	37	45	250/5	15.2
Albacore ⁸	62.1x8.2x6.7	x	x	45	1700/12	?
IKL209 ⁹	61.2x6.2x5.5	1150/1540	11/21.5	3200	1000/8	?
U-212 ¹⁰	56	1500	?	?	?	?
Seawolf ¹¹	108x12.9x10.9	7568/9137	35	38800	ilimitado	610

Fontes: 1 TURRINI e MIOZZI, 1999; 2 e 3 (GUERRA, 1964); 4 (in <http://www.subnetitalia.it/ubootII.htm>, Ac.: 18/02/05); 5 (in http://www.all-science-fair-projects.com/science_fair_projects_encyclopedia/Type_VII_U-boat, ac. 18/02/05); 6 (in <http://www.subnetitalia.it/ubootXXI.htm>, ac. 18/02/05) 7 (http://www.otwdesigns.com/Seehund/Seehund_big.htm, ac. 18/02/05); 8 (in http://www.all-science-fair-projects.com/science_fair_projects_encyclopedia/USS_Albacore_%28AGSS-569%29, ac.:20/02/05); 9 (<http://www.naviosdeguerrabrasileiros.hpg.ig.com.br/T/T070/T070.htm>, ac. 21/02/05) ; 10(<http://www.nordseewerke.de/d/prod/>

klasse212.html ac. 25/01/2006 11 <http://www.naval-technology.com/projects/seawolf/specs.html>, ac.: 21/02/05

A diminuição do tempo para submergir (tempo de imersão) é característica que sempre interessou aos projetistas, pois se associa à proteção contra ataques do inimigo. Laubeuf (1918) reporta que o Narval levava 28 min para imergir, quando lançado, e que esse tempo acabou reduzido para 12 min, em sua última modificação, e para apenas 6 min, na classe seguinte, Pluviôse (1915).

Pode-se dizer que se nota nos veículos capazes de submergir dois grandes ramos: os submarinos destinados para ataque, que sempre cresceram seu deslocamento (Tipo VII, 2ª. Guerra) e os destinados à defesa que se mantiveram pequenos (Seehund, 2ª. Guerra).

A literatura francesa do começo do século estabelecera ainda outra distinção entre os tipos de veículos capazes de submergir: de um lado o submarino puro e de outro o que se dizia submersível (LAUBEUF, 1918). Laubeuf (1918) explica que o primeiro tinha forma de torpedo ou gota, mais adequado à navegação submersa, como o Ictineo II; enquanto o outro era um navio de superfície capaz de submergir (como o Narval) (TURRINI e MIOZZI, 1999).

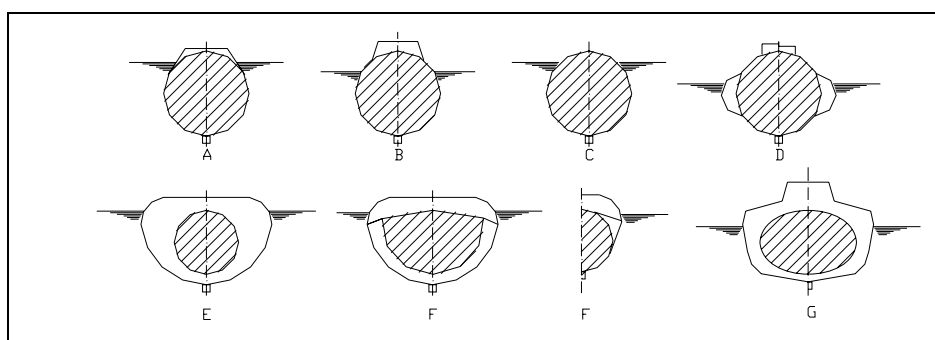


Figura 42 –Seções. Adaptado de Laubeuf (1918).

A Figura 42, adaptada de outra em Laubeuf (1918), apresenta as embarcações de seu tempo. De A a C, submarinos americanos e D, britânico, E a G submersíveis segundo classificação do autor. Hachuras indicam o volume resistente que em G é elíptico e F um polígono Irregular, nas seções mestra, à esquerda e, de vante, à direita. A linha d'água é representada pela linha horizontal superior em cada seção. Todas as seções têm pequena borda livre (em oposição a proposta desse trabalho). A seção E representa a seção mestra do Narval (lançado em 1899), com a maior reserva de flutuabilidade 42%, o único próximo ao híbrido com 50%. Em todos os demais ela é sempre menor que 30%, e concentra-se, sobretudo, na faixa de 10% a 15%. A, B e C

são submarinos com a reserva de flutuabilidade decrescente. D é marcado por grande reserva de flutuabilidade e formas bem modernas (Tipo E, britânico, lançado em 1912).

Contemporaneamente, entretanto, segundo Guerra (1964) e grande parte da literatura técnica, a distinção entre os submarinos e submersíveis, referem-se ao tempo de imersão, ou autonomia submersa: os submarinos puros seriam aqueles cuja autonomia fosse maior que o tempo de permanência na superfície e a velocidade submersa maior que aquela na superfície, donde suas formas serem mais adequadas a essa navegação, ou seja, formas torpédicas. Utiliza-se o termo *submarino verdadeiro* para os submarinos nucleares, ou seja, com propulsão nuclear. Esses veículos são virtualmente sem reabastecimento, em que o oxigênio é retirado da água por eletrólise e têm sua autonomia limitada apenas por fatores relativos à tripulação.

No entender moderno, pode-se dizer que todo o desenvolvimento do período da Grande Guerra e do entreguerras se dá na versão submersível, pois por sua limitada autonomia, o submarino puro de Laubeuf era uma arma ineficiente. Assim ocorre o aumento da velocidade na superfície e do raio de ação, a adição de canhões e de minas. O entendimento do período é de que o submarino torna-se mais ofensivo quanto maior seu deslocamento. Na Figura 43, um submarino do período, o Tipo II. Nesta época foi projetado e construído o Tipo VII (Figura 44).

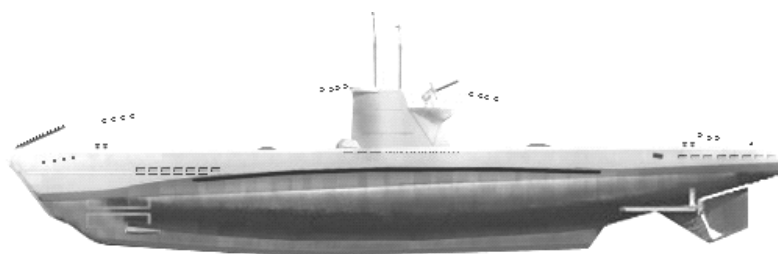


Figura 43 - Tipo II, alemão. (<http://www.subnetitalia.it/ubootII.htm> ac.: 20/02/05)

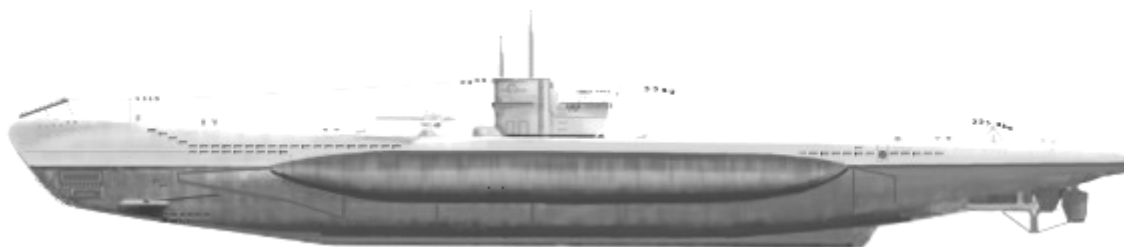


Figura 44 - Tipo VII, alemão. (<http://www.subnetitalia.it/ubootVII.htm> ac.: 20/02/05)

A 2ª. Guerra Mundial observou simultaneamente todos esses tipos de navios: submersíveis grandes destinados ao ataque de tráfego marítimo, navios pequenos destinados à defesa da costa e construídos às centenas, notadamente pelas potências do

eixo, e, no término do período, o precursor dos submarinos modernos, o Tipo XXI, alemão, destinado a ter maior autonomia e velocidade quando submerso que na superfície, e já dispondo de AIP (à base de peróxido de hidrogênio).

Nesse período, os americanos desenvolveram os submarinos de esquadra (*fleet submarines*). Tratava-se de grandes navios que operariam na superfície até o contato com o inimigo, quando imergiriam. A nomenclatura de esquadra se dá em virtude de que o navio operaria satisfazendo as necessidades dos demais navios componentes da esquadra das marinhas de guerra, assim, uma velocidade de superfície de 21.5 nós, a mesma dos encouraçados, bem como muitas características típicas de navios de superfície, como redundância de equipamentos e muitas anteparas estanques (GUERRA, 1964). Um exemplo desse tipo de navio é o USS Triton a seguir.



Figura 45 - USS TRITON Official U.S. Navy Photograph, da coleção do Navalhistorical Center. U.S. Naval Historical Center Photograph # NH 99279.

Com o fim da guerra ficaram evidentes duas vertentes, que posteriormente se distanciaram:

- (i) os submarinos, melhores submersos que na superfície, exemplo TYPE XXI, já citado;
- (ii) os submersíveis: melhores na superfície que submersos, exemplo o Seehund e o Tipo VII;

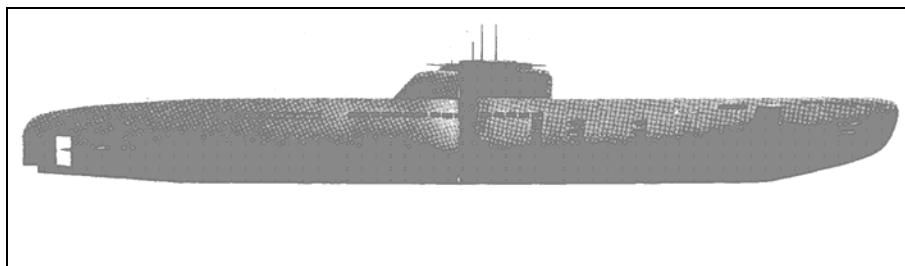


Figura 46 - Tipo XXI (GUERRA, 1964)



Figura 47 - Tipo XXI (<http://www.submarine-history.com/NOVAfour.htm>, ac.:20/02/05)



Figura 48 – Seehund, alemão, tripulado por dois homens, fonte: [http:// www.otwdesigns.com/Seehund/ Seehund_big.htm](http://www.otwdesigns.com/Seehund/Seehund_big.htm) , ac. : 20/02/05

Os submersíveis extinguiram-se completamente em razão de serem alvos fáceis na superfície, pois não tinham artilharia antiaérea, nem defesa contra grandes navios e também devido à baixa velocidade e raios de ação em imersão, donde não alcançam alvos em sigilo. Os submarinos evoluíram para a forma de gota, e para propulsão independente do ar, AIP (air independent propulsion, e nuclear).

A forma semelhante à de Zeppelins foi reinventada no submarino teste Albacore (na Figura 49) que incorporava muitas características novas em desenvolvimento, inclusive arranjos arquitetônicos do compartimento de comando (GUERRA, 1964).

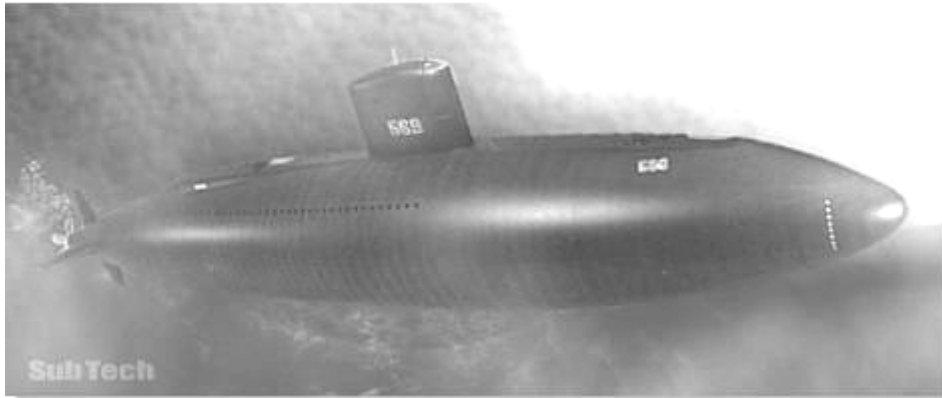


Figura 49 – Albacore (<http://www.rcboats.com/albacore.html>, ac.:20/02/05)

Os mais modernos submarinos construídos no século XX, como o IKL 209, a seguir, eliminaram por completo o armamento no convés, como canhões e balastrada e sempre que possível se aproximaram de formas hidrodinâmicas próprias à navegação submersa como torpedos. Outra importante modificação foi tentar maximizar a autonomia submersa e minimizar o tempo na superfície, onde a vulnerabilidade dos submarinos é notória. Nesse sentido é que há o surgimento dos submarinos nucleares (Sea Wolf, por exemplo) e AIP (como X-1 a seguir).

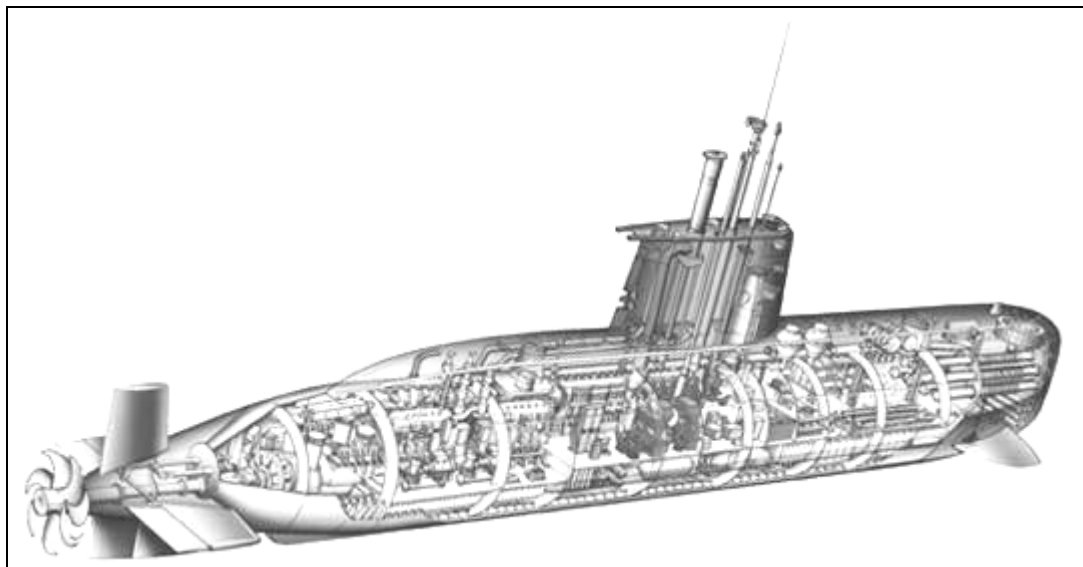


Figura 50 - Moderno Submarino, IKL 209, (<http://www.naviosdeguerrabrasileiros.hpg.ig.com.br/T/T070/T070-f17.htm>, Ac.:21/02/05)

Hoje há submarinos que utilizam AIP, mas não com a tecnologia do fim da guerra, à base de peróxido de hidrogênio. Parecem existir sim, simultaneamente, tentativas de utilização de células de hidrogênio, como o projeto do U-212(Tabela 7) ou à base de motores stirling, como a classe sueca Götlund, já em operação.



Figura 51 - X-1 movido a diesel e peróxido de hidrogênio ([http:// www.submarine-history.com/NOVAfour.htm](http://www.submarine-history.com/NOVAfour.htm), ac.:21/02/05) abandonado pela instabilidade da combinação Peróxido e Diesel.



Figura 52 – Seawolf. (<http://www.naval-technology.com/projects/seawolf/seawolf7.html>, ac.:21/02/05)

3.1.4.2 CARACTERÍSTICAS DOS SUBMARINOS

Os submarinos se caracterizam basicamente por:

- (i) Capacidade de ocultação.
- (ii) Relativa independência dos problemas ambientais da superfície;
- (iii) Mobilidade tridimensional;
- (iv) Grande autonomia;
- (v) Limitação de comunicações (não opera ondas rádio, quando submerso);
- (vi) Dependência de informações;
- (vii) Incapacidade de defesa antiaérea;
- (viii) Raramente têm deslocamentos menores que 1000t.

3.1.4.3 TAREFAS DOS SUBMARINOS

O submarino, portanto, executa as seguintes tarefas.

- (i) ataque ao tráfego marítimo;
- (ii) ataque às unidades navais de superfície;
- (iii) ataque a submarinos inimigos;

- (iv) ataque a objetivos terrestres;
- (v) operações de minagem de portos (como as realizadas nos portos americanos pelos alemães na 2ª. Guerra);
- (vi) apoio à operações especiais, como o envio de mergulhadores de combate (submarino ASDS, americano, criado para esse fim);
- (vii) operações de espionagem.

3.1.5 NAVIOS SEMI-SUBMERSÍVEIS

Turrini e Miozzi (1999) relatam que no período inicial de desenvolvimento da arma submarina (séc. XX) houve navios semi-submersíveis: veículos de superfície, que podiam alagar tanques de lastro e ocultar-se de forma a desferir ataques surpresa e diminuir sua parte exposta. Os mesmos autores explicam que tal tipo de embarcação fracassou em virtude da maior manobrabilidade e armamento dos navios de superfície.

Pode-se dizer que esse tipo de navio é, em parte, o caso da versão V6, apresentada nesse trabalho, que também procura se ocultar do radar e do campo de visão de embarcações e aeronaves, via submersão. A concepção semi-submersível foi abandonada no passado, porque a submersão atrapalha as características manobreiras da embarcação o que as tornou vulneráveis nas batalhas do início do século XX.

As batalhas atuais travam-se a grandes distâncias e as características manobreiras que ficavam prejudicadas no passado, são irrelevantes militarmente desde a 2ª Guerra Mundial. Pode-se dizer que o maior problema atual é a detecção à distância e um navio, como aquele da versão V6, tem de fato uma vantagem em ocultar-se.

3.1.6 NAVIO PATRULHA COM CARACTERÍSTICAS SUBMERSÍVEIS: UM HÍBRIDO

A análise geopolítica da atualidade determina que de fato há uma mudança do cenário dos conflitos marítimos, antes oceânicos (“blue water”) e doravante em águas rasas, barrentas (“brown water”) (JOERGENSEN, 1998).

Todo o problema reside no fato de que os sensores e as armas não foram desenvolvidos para o ambiente de águas rasas, que influenciam não somente sonares e bóias sonares, mas também sensores de detecção de anomalias magnéticas. (JORGENSEN, 1998). Jorgensen (1998) explica que as armas disponíveis para a guerra anti-submarina têm como limite a profundidade e acabam sendo consumidas em falsos contatos provenientes de ruído ambiental, reflexões, diferenças entre as densidades das

águas doces dos rios e salgadas dos oceanos, o que favorece os pequenos submarinos convencionais.

Esse fato também é citado em “O Sonar na Guerra Anti-Submarino (GAS)” (2003) em que se relata que os altos níveis de ruído e reverberação dificultam a operação do sonar ativo ou passivo. Além das variações fontes de problemas como temperatura e salinidade, o artigo cita a natural dificuldade de detecção de ameaças devido à interferência geral encontrada tipicamente em áreas próximas da costa.

Vidigal (1997) prevê que as marinhas devem fazer uso da guerra de minas, estabelecendo campos defensivos nas áreas de maior valor estratégico ao longo de suas costas; estabelecendo plataformas de lançamento de mísseis superfície-superfície, em pontos estratégicos; dispor de uma força de submarinos de pequeno porte, adaptados à operação em águas rasas...”

O estaleiro russo KPAYM (2003) prevê que as principais tarefas das marinhas nas próximas décadas referem-se a

- (i) prevenção e participação de conflitos regionais;
- (ii) intervenção em missões antiterrorismo enquanto membro de coalisões ou das Nações Unidas;
- (iii) garantir as atividades econômicas nos oceânicos, tais como o tráfego marítimo e a exploração de recursos naturais e biológicos;
- (iv) colaborar junto às guardas costeiras para defesa das fronteiras;
- (v) participar de ações de resgate tanto em desastres ecológicos como em emergências em navios.

Nesse sentido mais adiante, o mesmo estaleiro propõe aos futuros navios das marinhas satisfazer aos seguintes requisitos:

- (i) serem por natureza *multipurpose*;
- (ii) possuírem uma universalidade de sensores e armas;
- (iii) serem dotados de pequenas silhuetas em todos os campos físicos, ou seja, radar, sonar e magnético;
- (iv) ter uma capacidade de sobrevivência grande em avaria causada por ataques de outros navios;
- (v) ter grande compatibilidade com navios de outras marinhas e possibilidade de comparação;
- (vi) ter o maior grau possível de segurança ambiental;
- (vii) ter boas condições de habitabilidade; e

(viii) ter alto grau de ergonomia.

Adicionando-se o conceito de custo às propostas do estaleiro, podem-se resumir os condicionantes aos navios do princípio do século XXI, aos seguintes quesitos:

- (i) meios de baixo custo capazes de desempenhar vários papéis;
- (ii) meios capazes de operar a baixos custos para proteção dos interesses econômicos;
- (iii) meios de sofisticado grau tecnológico;
- (iv) meios de grande poder de ocultação.

3.1.6.1 MISSÃO DO HÍBRIDO

Nota-se que o início do século XXI apresenta características estratégicas semelhantes às do início do século XX, como por exemplo, a defesa de portos e de áreas costeiras de forma a se evitar a projeção do poder sobre terra de esquadras oceânicas mais fortes.

Apesar de o uso de baterias de mísseis aparentemente dispensar o uso de navios tripulados nas missões de defesa do litoral, isso não se verifica na prática, vide Guerra do Golfo (em 1991) e recente invasão do Iraque (em 2004).

Por outro lado, o mundo contemporâneo apresenta forte preocupação social, e o navio patrulha é um meio barato de se fazer presente no atendimento da população carente.

Diante desse quadro e das missões apresentadas, seria de grande valia a uma nação não deixar de possuir, nesse século dois tipos de navios:

- (i) navios patrulha;
- (ii) submarinos (já que os submersíveis estão obsoletos desde o fim da guerra).

Os submarinos para uma nação pacífica seriam subproveitados no seu requisito raio de ação, e não se prestariam a missões de policiamento e salvatagem. Os navios patrulha prestar-se-iam melhor ao período de paz que ao de guerra, onde teriam de enfrentar esquadras com capacidade aérea muitas vezes superior a sua.

Parece que, nesse quadro, insere-se a necessidade de um novo meio, algo capaz de exercer simultaneamente essas funções, mas com ênfase na defesa, de onde a idéia de um híbrido devesse ser estudada, revivendo em parte a experiência anterior com os submersíveis.

O navio patrulha com características submersíveis pretende efetuar três das quatro missões mencionadas na seção 3.1.1: apoiar o exercício do Controle de Área Marítima, Negar o Uso de Área Marítima; e fazer-se presente sem efetuar a projeção do poder sobre terra. Na verdade, o navio patrulha com características submersíveis atua muito mais como uma mina, em torno do porto, pois seu raio de ação não é tão grande.

3.1.6.2 TAREFAS DO NAVIO PATRULHA COM CARACTERÍSTICAS SUBMERSÍVEIS

As tarefas que se seguem são combinações das tarefas hoje desenvolvidas independentemente por submarinos e navios patrulhas e podem ser efetuadas pelo patrulha submersível:

- (i) ataque às unidades navais de superfície;
- (ii) ataque a submarinos inimigos;
- (iii) destruir ou neutralizar unidades de superfície;
- (iv) defender costa, porto ou área marítima restrita;
- (v) proteger tráfego marítimo costeiro;
- (vi) transportar equipes destinadas a operações especiais;
- (vii) fiscalizar, *lato sensu*, a ZEE, com as capacidades de parar, abordar e apreender embarcações infratores;
- (viii) mostrar a bandeira de uma nação;
- (ix) executar ações de salvamento.

3.1.6.3 CARACTERÍSTICAS DOS HÍBRIDOS

Assim converge-se para a caracterização desse novo tipo de embarcação:

- (i) Pequeno calado.
- (ii) Deslocamento em torno de 250t, na superfície e 500 t submerso (limite inferior dos pequenos submarinos);
- (iii) Velocidade suficiente para interceptar navios pesqueiros;
- (iv) Pequena silhueta (pretende ser *stealth*);
- (v) Boa manobrabilidade;
- (vi) Raio de ação limitado;
- (vii) Autonomia limitada;
- (viii) Nenhuma capacidade antiaérea;

- (ix) Comportamento no mar precário, entretanto, podendo submergir e operar independente das condições na superfície;
- (x) Velocidade afetada pelas condições de mar.
- (xi) Limitação de comunicações (não opera ondas rádio, submerso);
- (xii) Dependência de informações;
- (xiii) Mobilidade tridimensional.

3.1.7 COMPARAÇÕES ENTRE AS TAREFAS DO HÍBRIDO DO SUBMARINO E DO PATRULHA

Tabela 8 - Tarefas do patrulha com características submersíveis

Patrulha Submersível	Submarino	Patrulha
ataque às unidades navais de superfície;	ataque às unidades navais de superfície;	destruir ou neutralizar unidades de superfície;
ataque a submarinos inimigos;	ataque a submarinos inimigos;	Não atende
defender costa, porto ou área marítima restrita;	ataque a objetivos terrestres.	defender costa, porto ou área marítima restrita;
proteger tráfego marítimo costeiro;	Não atende	proteger tráfego marítimo costeiro;
apoio à operações especiais	apoio à operações especiais,	apoio à operações especiais;
fiscalizar a ZEE	Não atende	fiscalizar a ZEE;
mostrar a bandeira de uma nação;	Não atende	mostrar a bandeira de uma nação;
executar ações de salvamento.	Não atende	executar ações de salvamento.
Não atende	Ataque ao tráfego marítimo;	Não atende
Não atende	operações de espionagem.	Não atende
Não atende	operações de minagem de portos	Não atende

Pode-se notar claramente que essa embarcação não faz todas as missões que o submarino tem condições de realizar, nem tampouco executa todas as missões do patrulha. Note-se que o não atendimento à minagem de portos é devido à dificuldade de transporte de minas e outros tipos de armamentos. Pode-se, entretanto, no futuro, projetar uma variante capaz de realizar esse serviço.

Enfim, o patrulha com características submersíveis pode ser entendido como um superpatrulha, que mergulha, muito lembrando os submersíveis da primeira guerra (incapazes de patrulhar no século XXI, por sua baixa velocidade), um submarino para

defesa de porto, mas com características de grande desempenho na superfície ou grande raio de ação; ou de outro ângulo, uma mina tripulada capaz de desferir golpes certos em esquadras poderosas, aproveitando-se do ruído ambiental para viabilizar sua ocultação.

3.1.8 COMPARAÇÕES ENTRE AS CARACTERÍSTICAS DO HÍBRIDO DO SUBMARINO E DO PATRULHA

A tabela a seguir é resumitiva das características do navio patrulha de formas não convencionais com características submersíveis.

Tabela 9 - Características do híbrido em comparação com submarinos e patrulhas

Patrulha Submersível	Submarino	Patrulha
Pequeno calado.	Calado moderado	Pequeno calado.
Deslocamento em torno de 250t, na superfície e 500 t submerso	Deslocamento 500 a 1500, SSC e 1500 adiante SSK	Deslocamento menor que 500t
Pequena silhueta (pretende ser stealth);	Capacidade de ocultação	Pequena silhueta (podem inclusive ser stealth);
Boa manobrabilidade;	Boa manobrabilidade;	Boa manobrabilidade;
Raio de ação limitado;	Grande raio de ação;	Raio de ação limitado;
Autonomia limitada;	Grande autonomia;	Autonomia limitada;
Pequena capacidade de defesa antiaérea;	Incapacidade de defesa antiaérea;	Pequena capacidade de defesa antiaérea;
Comportamento no mar precário, entretanto, podendo submergir e operar independente das condições na superfície;	Relativa independência dos problemas ambientais da superfície;	Comportamento no mar precário,
Velocidade afetada pelas condições de mar.	Velocidade afetada pelas condições de mar.	Velocidade afetada pelas condições de mar.
Limitação de comunicações	Limitação de comunicações	
Mobilidade tridimensional.	Mobilidade tridimensional.	

Em resumo, pode-se afirmar que o navio patrulha de formas não convencionais com características submersíveis é essencialmente destinado à defesa, retomando o ramo dos submersíveis que se perdeu com o fim da 2ª Guerra.

Assim como todos os submersíveis, o patrulha submersível apresenta como ônus baixas velocidades submersas, mas apresenta grande velocidade na superfície.

Comparativamente às classes alemãs UB costeira (1ª Guerra) e Tipo II (2ª Guerra) de deslocamentos muito próximos, leva 5200 kW em vez dos 89 kW e 322 kW atinge velocidades 3.4 e 1.7 vezes maiores, suficientes para interceptação.

Como nenhum outro submersível, apresenta grande autonomia submersa cujo limitante é apenas de origem mecânica, pois sua pequena tripulação pode passar até 15 dias submersa.

O patrulha submersível aproveita-se dos fenômenos de propagação do som na água. Tais características somente são possíveis se utilizar-se de conceitos desconhecidos na década de 40, tais como:

- (i) automatização capaz de reduzir a tripulação a poucos homens (6), (Freire, 2002);
- (ii) aços de elevada tensão de escoamento (aumentando de 205 MPa e 420 MPa para atuais 551 MPa) e ligas de alumínio;
- (iii) baterias de altíssima densidade ;
- (iv) cascos de sustentação dinâmica (exceto na versão SWATH);
- (v) Turbinas a gás e hidrojetos;

Se o híbrido tivesse os mesmos cascos utilizados na década de quarenta (século XX), o navio deveria ter cerca de 70 m de modo a superar a barreira de resistência de ondas representada pelo número de Taylor de 1.34. Aumentar o comprimento era a forma de aumentar a velocidade como aconteceu no submarino alemão Type VII. O patrulha submersível, entretanto, pode atingir a mesma velocidade com menos de 40 metros, o que respresenta uma redução de 54% no comprimento, implicando em barateamento de custos. O relacionamento entre velocidade e comprimento fica melhor ilustrado no gráfico da Figura 53, onde aparecem o comprimento mínimo necessário para atingir determinada velocidade para cascos de deslocamento, ou seja, a velocidade limite atingida por um casco de deslocamento.

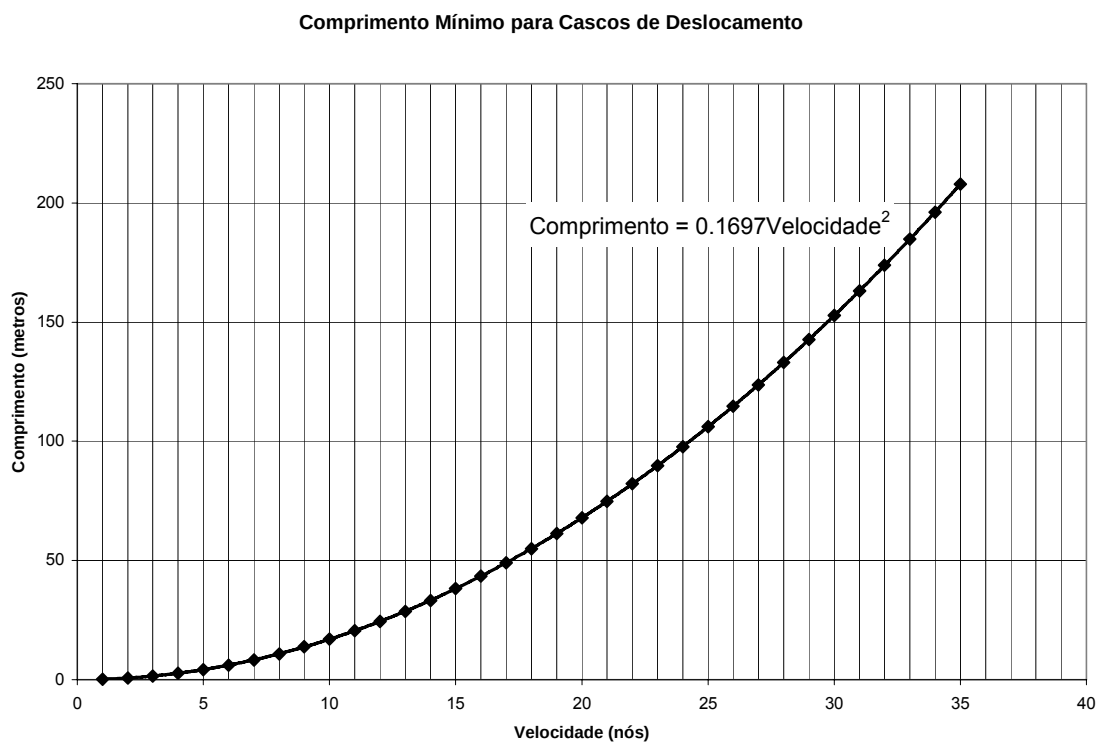


Figura 53 - Barreira de 1.34 Taylor e seus reflexos no comprimento mínimo das embarcações

Além da evolução dos cascos para concepções que ultrapassam a barreira de ondas, o volume da potência instalada ficou sensivelmente menor. A Tabela 10 apresenta valores de peso, volume e potência obtidos para motores MTU e da Turbina Eurodyn da Rolls Royce. A vantagem de utilização de turbina de potência é evidente.

Tabela 10 – Comparação entre pesos e volumes de turbinas e motores

Modelo	Potência [kW]	Peso [t]	Volume total [m ³]	Peso/Potência	Volume/Potência
12V 396	1390	4460	27	3.21	0.019
16V 595	3760	11110	20	2.95	0.005
Turbina	Potência	Peso	Volume	Peso/Potência	Volume/Potência
Eurodyn	2600	2800	13.7	1.07	0.005

3.2 CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE

3.2.1 MAR TERRITORIAL, ZONA CONTÍGUA E ZONA ECONÔMICA EXCLUSIVA

A guerra foi conceituada por Clausewitz (1831) como a continuação da política por outros meios. Logo, com navios de guerra se faz política, daí a importância operacional dos conceitos políticos e jurídicos associados ao mar. Assim, os setenta e um por cento da superfície terrestre coberta pela água (ODUM et al. ,1988) têm significado muito diferente dependendo de sua distância aos continentes e às ilhas.

A Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar de Montego Bay, Jamaica, de 10-12-1982, de quem o Brasil é signatário, estabelece distinções quanto a prerrogativas dos países, seus limites de soberania, e direitos de exploração econômica dos mares.

No Brasil, é necessária a promulgação de lei ordinária para fazer valer os acordos internacionais firmados pelo poder executivo. Essas leis, nada mais são que cópias desses acordos internacionais. Assim a lei 8.617 de 4 de janeiro de 1993, apenas repete o firmado na dita convenção internacional em seu art. 2º. Em resumo, as referidas leis dividem os oceanos em:

- (i) mar territorial;
- (ii) zona contígua (ZC);
- (iii) zona economicamente exclusiva (ZEE);
- (iv) plataforma continental;
- (v) alto mar.

Pelo art. 1º, da lei 8.617/93, Artigo 20 da Convenção, o mar territorial compreende uma faixa de doze milhas marítima de largura. Nele, o país exerce sua soberania inclusive no espaço aéreo sobrejacente, seu leito e subsolo, em outras palavras, é território do país costeiro, nesse caso o Brasil. A lei brasileira nada diz, entretanto, se os submarinos e quaisquer outros veículos submersíveis devem navegar à superfície e arvorar a sua bandeira quando no mar territorial.

A Zona Contígua (Art. 4º - lei 8.617) compreende uma faixa que se estende das doze às vinte e quatro milhas marítimas, nela o país pode tomar as medidas de fiscalização necessárias para:

- (i) evitar as infrações às leis e aos regulamentos aduaneiros, fiscais, de imigração ou sanitários, no seu território, ou no seu mar territorial;
- (ii) reprimir as infrações às leis e aos regulamentos, no seu território ou no seu mar territorial.

A zona econômica exclusiva (ZEE), Art. 6º, 8.617, estende-se numa faixa que se estende das doze às duzentas milhas marítimas, contadas a partir das linhas de base que servem para medir a largura do mar territorial. Nela o país tem a soberania para fins de exploração e aproveitamento, conservação e gestão dos recursos naturais, vivos ou não-vivos, das águas sobrejacentes ao leito do mar, do leito do mar e seu subsolo, e no que se refere a outras atividades com vistas à exploração e ao aproveitamento da zona para fins econômicos.

O Art. 8º dá ao país o direito exclusivo de regulamentar a investigação científica marinha, a proteção e preservação do meio marítimo, bem como a construção, operação e uso de todos os tipos de ilhas artificiais, instalações e estruturas.

A plataforma continental (Art. 11) compreende o leito e o subsolo das áreas submarinas que se estendem além do seu mar territorial, em toda a extensão do prolongamento natural de seu território terrestre, até o bordo exterior da margem continental, ou até uma distância de duzentas milhas marítimas das linhas de base, a partir das quais se mede a largura do mar territorial, nos casos em que o bordo exterior da margem continental não atinja essa distância.

Nessa região, o país exerce (Art. 12) direitos de soberania para efeitos de exploração dos recursos minerais e outros não-vivos do leito do mar e subsolo, bem como os organismos vivos pertencentes a espécies sedentárias, isto é, àquelas que no período de captura estão imóveis no leito do mar ou no seu subsolo, ou que só podem mover-se em constante contato físico com esse leito ou subsolo.

3.2.2 RELEVO SUBMARINO

O fundo do oceano é constituído de cinco diferentes zonas de profundidade:

- (i) uma contígua à linha da costa, com profundidade crescente até 200m, dita plataforma continental, que cobrem cerca de 6% da superfície do planeta (PINHEIRO e CARVALHO, 2004);

- (ii) um adjacente àquela com uma queda brusca na direção da Bacia Oceânica em um ângulo de, aproximadamente, 4° até cerca de 4000 m, conhecida por talude;
- (iii) o fundo do oceano, na profundidade máxima atingida pelo talude;
- (iv) platôs, que são elevações no assoalho oceânico, com 1 a 2km de altura (PINHEIRO e CARVALHO, 2004). Não alcançam a superfície e não são parte das cordilheiras oceânicas; por fim,
- (v) profundos abismos, conhecidos por fossas abissais, atingindo de 5000 a 11700, a maior delas nas ilhas Marianas, normalmente vizinhas a platôs.

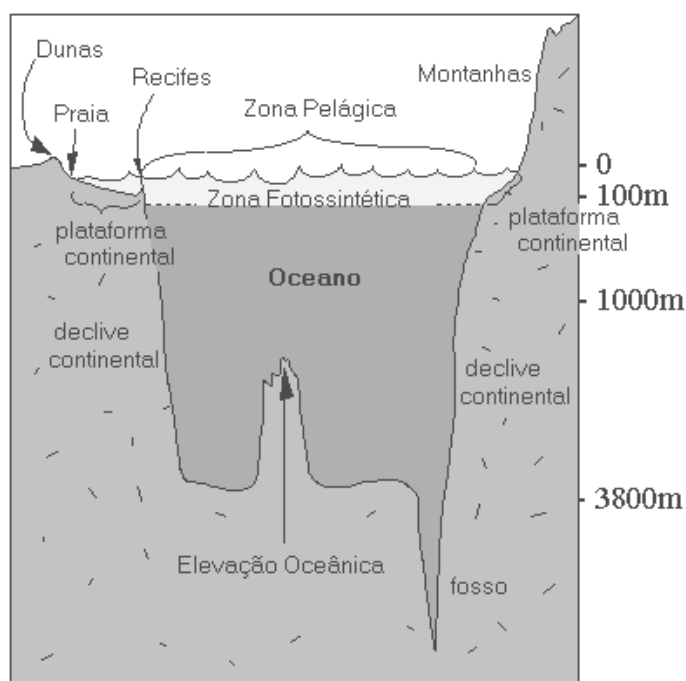


Figura 54 - Relevo submarino (ODUM et al., 1998)

3.2.3 AMBIENTE DE TRABALHO DO HÍBRIDO

O ambiente de trabalho do híbrido é o mesmo ambiente dos navios patrulhas, ou seja, a extensão de mar que vai até no máximo a ZEE, Zona Economicamente Exclusiva, incluindo a Plataforma. Por sua natureza defensiva, o híbrido deve operar como submarino, junto aos portos, por isso, em baixas profundidades.

Esse ambiente resulta diretamente das leis que determinam a soberania dos estados. A função do híbrido é, portanto, dar proteção ao mar territorial e exercer a fiscalização nos limites da ZEE e da plataforma.

3.3 DETERMINAÇÃO DOS REQUISITOS

Como deve satisfazer às características e tarefas apresentadas, o Patrulha Submersível tem necessariamente que:

- (i) possuir 5 velocidades distintas: patrulha na superfície; interceptação na superfície, em torno de 20 nós; máxima submersa (para fuga), a maior possível ; mínima submersa , suficiente para vencer as correntes marinhas;
- (ii) portar torpedos (ou mísseis) e metralhadoras;
- (iii) ter raio de ação compatíveis com os dos patrulhas típicos;
- (iv) um requisito adicional é ter pequena tripulação. Por Freire (2002), percebe-se claramente a utilidade do uso de mais automação em detrimento do uso de mais tripulantes. No caso do híbrido há necessidade de economia de espaço, de víveres e água e, portanto, é desejável que se minimize a tripulação.
- (v) profundidade compatível com a missão em duas regiões: muito pequena, menor que dez metros, ou grande, cerca de 200m;
- (vi) autonomia máxima possível;
- (vii) tripulação menor possível.

Os requisitos de raio de ação, autonomia, velocidade e profundidade merecem especial atenção. Com a aplicação da DEA, capítulo 7, chegou-se a valores maximizantes da função de mérito, como a autonomia de 15 dias. Além disso, propôs-se uma tripulação de seis homens revezando-se dois a dois nos tradicionais 3 turnos de 8h (na linguagem técnica naval, 3 quartos de 8h).

3.3.1 VELOCIDADE SUBMERSA

A determinação da velocidade máxima submersa leva em conta as ameaças a serem enfrentadas pelo híbrido. Armo (2000) estima em 18 nós a velocidade necessária para atingir-se uma probabilidade de sobrevivência a ataques de torpedos leves menor que 50%. Essa probabilidade não cresce com o aumento da velocidade e decresce linearmente até 12 nós, a partir da qual é zero.

As aeronaves embarcadas, especialmente os helicópteros, costumam operar nas proximidades dos navios, utilizando seus sonares para a localização dos alvos.

O híbrido encontra-se protegido junto à costa, onde os helicópteros não conseguem operar sem se tornarem alvos fáceis, logo o ataque torpédico fica dificultado e, portanto, foge de certa forma às condições de contorno do problema.

Com tão baixa probabilidade de sobrevivência, não compensa buscar o aumento de velocidade, em virtude de isso sobrecarregar os sistemas de bordo que aumentam em volume e peso.

Assim prefere-se tomar a iniciativa de adotar a velocidade máxima possível, tendo como limitantes outros fatores que mais tarde aparecem no projeto.

3.3.2 VELOCIDADE DE PATRULHA NA SUPERFÍCIE

A velocidade de patrulha na superfície advém do fato de que o navio deve apresentar uma baixa velocidade compatível com os outros meios marítimos de forma a se tornar imperceptível, ou melhor, passível de ser confundido com as pequenas embarcações que trafegam na superfície, como pesqueiros, barcos de turismo e navios pequenos de serviço, o que se pode entender pela “interferência geral da costa”, nas palavras do artigo “O sonar na guerra anti-submarino (GAS)”(2003).

Essas embarcações pequenas têm comprimentos que variam de 20 a 30m e sua máxima velocidade de operação costuma ocorrer no número de Taylor de 1.34, barreira de resistência de ondas.

Os motores dessas embarcações costumam ser dimensionados para operarem em velocidades econômicas menores, cerca de 90 % desse valor. Isso resulta em uma faixa de velocidade com boa eficiência de patrulhamento de 10 a 12 nós.

Utilizando a velocidade como meio de ocultamento, caso o híbrido navegasse nessa faixa, sua pequena silhueta radar permitiria uma ocultação razoável, de difícil quantificação.

3.3.3 VELOCIDADE DE INTERCEPTAÇÃO (ATAQUE)

Como o patrulha tem interesse em embarcações lentas (10 a 12 nós) que na maioria das vezes se prestam à pesca e à extração de recursos minerais, uma velocidade maior que 20 nós é realmente suficiente. Apesar de muitos desses navios, possuírem velocidades de interceptação muito superiores, o fato é que essas velocidades nunca são

efetivas (RUDKO, 2003) em virtude da diminuição perversa da velocidade com as ondas.

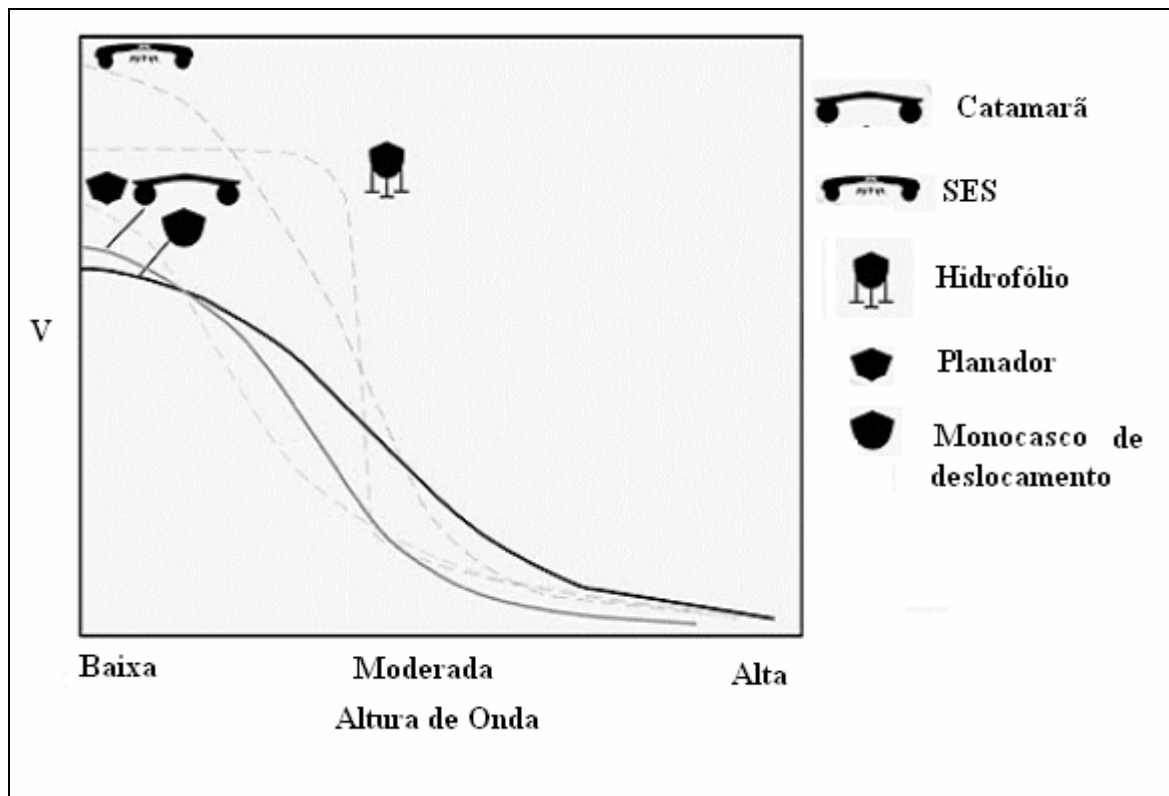


Figura 55 -Diminuição da velocidade com a altura de ondas (adaptado de Rudko, 2003)

3.3.4 VELOCIDADE MÍNIMA

Essa velocidade significa que seus motores não carbonizam a essa velocidade e todos os sistemas podem operar convenientemente.

O híbrido deve ter uma velocidade mínima mantida maior que a das correntes oceânicas que vão a 2 nós, portanto se situa em valores maiores que 3 nós.

3.3.5 PROFUNDIDADE

A profundidade funciona para o patrulha submersível como meio de ocultação. Quando um patrulha é detectado por uma aeronave, poucas são as chances de sobrevivência. Assim quanto mais tempo permanecer oculto, melhor.

As táticas de guerra dos patrulhas são, normalmente, ocultar-se junto à costa, e a outras embarcações miúdas. Tanto melhor para ocultar-se, se pudessem submergir.

Os submarinos estão livres e seguros dos radares dos aviões e dos helicópteros, enquanto submersos. A caçada, entretanto, dá-se por escuta sonar. Para melhor

compreensão do problema é necessária a compreensão dos equipamentos que se utilizam para detecção submarina, ou seja, o sonar.

3.3.5.1 ESPÉCIES DE SONAR

O sonar ativo funciona enviando pulsos (*pings*) de ondas sonoras e medindo a reflexão dessas ondas. A utilização de ondas sonoras ocorre porque as ondas de rádio não penetram a menos de poucos metros sob a água.

O sonar passivo capta os sons do ambiente. Esse é o tipo de sonar dos submarinos, pois capta ruídos sem revelar presença por sua emissão.

O artigo “O Sonar na Guerra Anti-Submarino (GAS)” (2003) apresenta o alcance típico dos sonares empregados atualmente:

Tabela 11 – Alcance dos tipos de sonar (adaptado de “O Sonar na Guerra Anti-Submarino (GAS)”, 2003)

Tipo de sonar	Alcance de Detecção
passivos de submarinos	53 milhas
ativos de navios	25 milhas
ativos de helicópteros	13 milhas

3.3.5.2 PROPAGAÇÃO DO SOM

As variáveis que afetam propagação do som no oceano são a temperatura, a pressão e a salinidade. Na profundidade em torno de 30 a 100 m ocorre uma mudança rápida na temperatura que é conhecida como termoclina, ou camada. (“O Sonar...”,2003)

As ondas sonoras se comportam em relação à camada assim como as ondas luminosas em relação aos corpos transparentes, sendo parte refletidas, parte refratadas e parte dissipadas.

A profundidade da camada varia de um local para outro o que faz com que os submarinos variem sua profundidade de forma a permanecer abaixo dela para se esconderem de navios de superfície. A Figura 56 ilustra a profundidade de camada como uma linha pontilhada. (“O Sonar...”,2003).

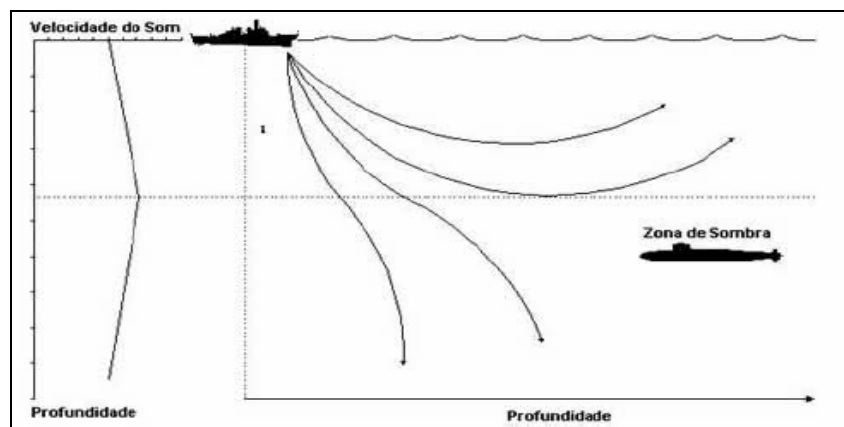


Figura 56 – Profundidade de camada. Fonte:"O Sonar na Guerra Anti-Submarino(GAS)" , 2003

3.3.5.3 EFEITO DAS ÁGUAS RASAS

As águas rasas exercem o efeito de produzirem ruídos que interferem na detecção do submarino. Segundo novamente o artigo “O Sonar na Guerra anti-submarino(GAS)”(2003), o ambiente litorâneo se caracteriza por altos níveis de ruído e reverberação que dificultam a operação do sonar ativo ou passivo; mistura da água doce com a água do mar nos estuários dos rios, criando variações "suspeitas" na temperatura e na salinidade; natural dificuldade de detecção de ameaças devido à interferência geral encontrada tipicamente em áreas próximas da costa, o que frequentemente provoca uma alta taxa de alarmes falsos, atrapalhando os operadores sonar, o que pode ser ilustrado pela Figura 57 a seguir.

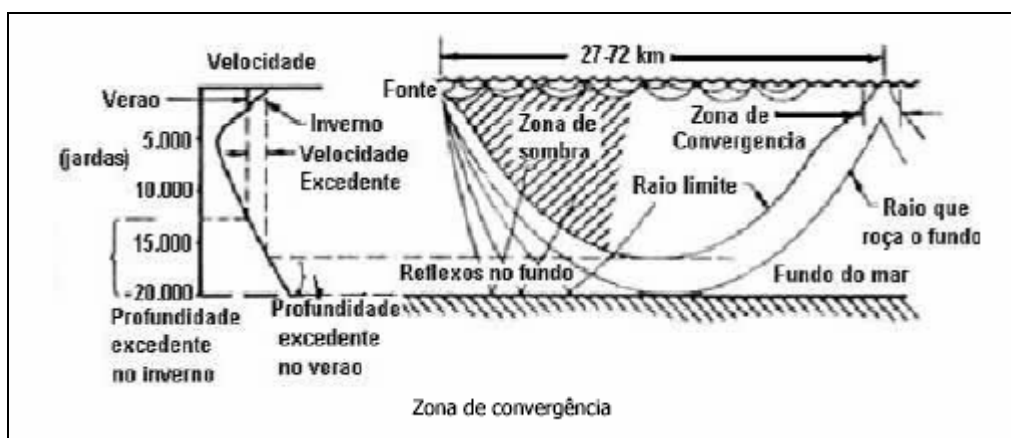


Figura 57 – Reflexões de ondas sonoras. Fonte:"O Sonar na Guerra Anti-Submarino(GAS)" , 2003

3.3.5.4 EFEITO DO ZOOPLÂNCTON

O zooplâncton (e alguns outros peixes) efetua um movimento cíclico entre o dia e a noite (ODUM et al., 1988). Durante a noite, quando não é tão visível para os carnívoros, está mais próximo à superfície e, mais profundamente durante o dia. Esses organismos também refletem o sonar (ondas sonoras), parecendo um falso fundo marinho (ODUM et al., 1988), como na Figura 58, adaptada do mesmo livro:

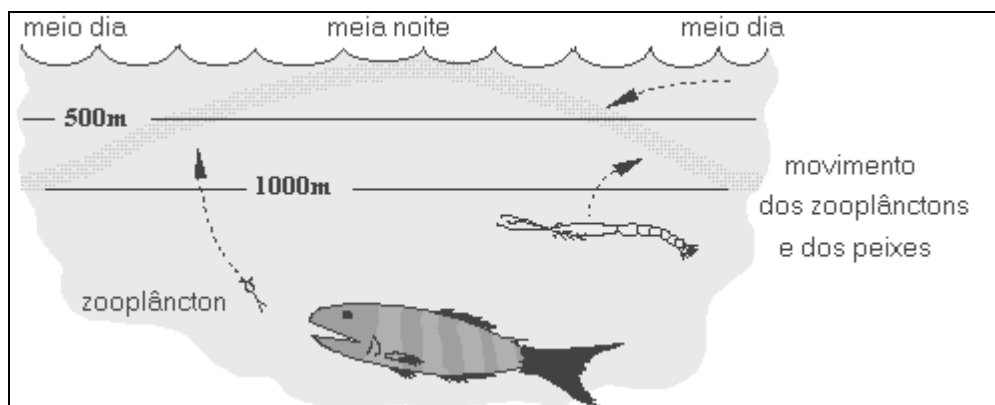


Figura 58 – Reflexão sonar pelo zooplâncton (ODUM et al.,1998)

3.3.5.5 PROFUNDIDADE PARA O NAVIO PATRULHA DE FORMAS NÃO CONVENCIONAIS COM CARACTERÍSTICAS SUBMERSÍVEIS

Pelo que se pode notar, quanto maior a profundidade, melhor para evitar a detecção. O ônus de se operar em uma profundidade muito grande, entretanto, é que o peso que se carrega de casco de pressão (ou resistente) também deve ser bem grande.

Uma profundidade muito pequena, porém, leva à fácil detecção nos oceanos, exceto quando próximo ao ruído de superfície, ou seja, menos de 3m, altura das ondas de superfície.

O fundo dos oceanos é raramente atingido por qualquer submarino. Como não é projetado para ultrapassar a ZEE, ou a plataforma, o híbrido não precisa apresentar profundidades de operação superiores a 200m para operar satisfatoriamente.

A natureza da profundidade de operação ramifica o híbrido em duas possíveis versões:

- (i) Uma que apenas se oculta a baixa profundidade, não maior que 4 m (ondas) apenas para se esquivar do radar;

- (ii) Uma outra que se aproveita dos efeitos de fundo (efeitos térmicos, de águas rasas, do zooplâncton). Essa versão teria de submergir a duzentos metros, e pousar no fundo, onde se confundiria com o relevo.

3.3.6 RAIÃO DE AÇÃO

Atualmente dois são os tipos de submarinos convencionais: SSC e os SSK (ARMO, 2000). Segundo esse autor, os SSC são pequenos com deslocamento entre 500 e 1500 t projetados para operações costeiras, os SSK, por sua vez, operam em águas azuis, tendo um raio de ação semelhante aos de fragatas.

O gráfico da Figura 59 pode ser obtido a partir dos dados de Jackson (2000), quando se organizam os dados apresentando-se apenas os submarinos construídos após o ano de 1945.

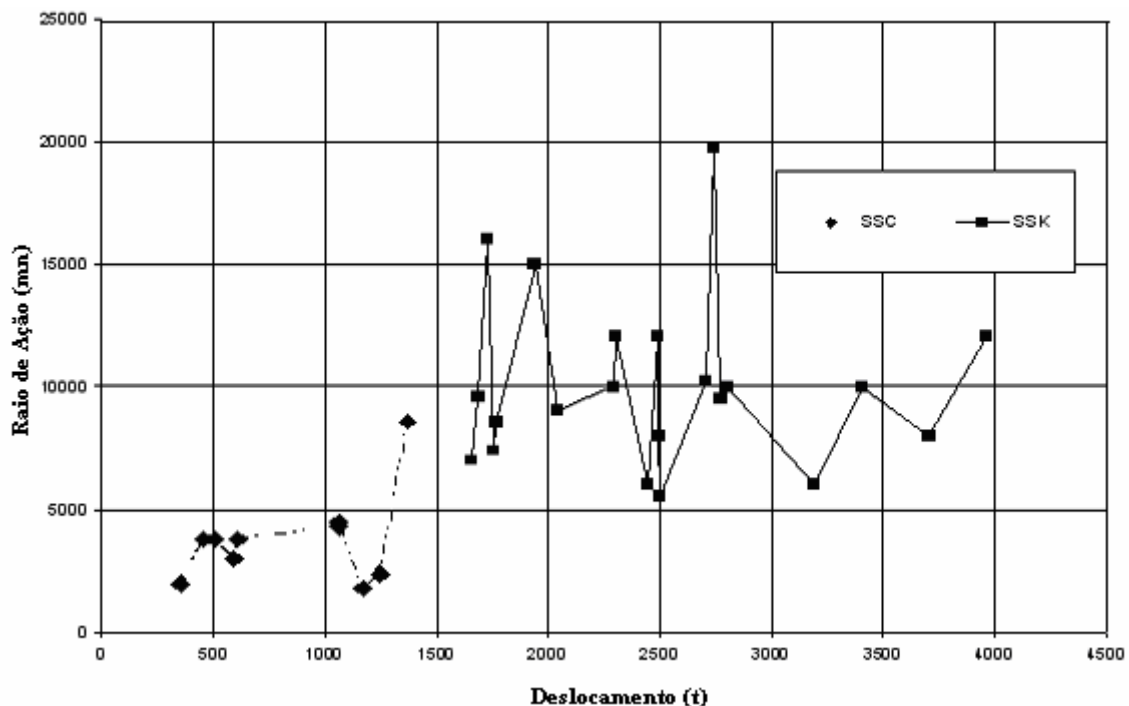


Figura 59 – Raio de Ação de vários submarinos em razão do deslocamento

Os navios patrulha por sua vez apresentam valores típicos na faixa de 2000 milhas náuticas. O gráfico 60 apresenta uma série de patrulhas que serviram de base de dados para o problema:

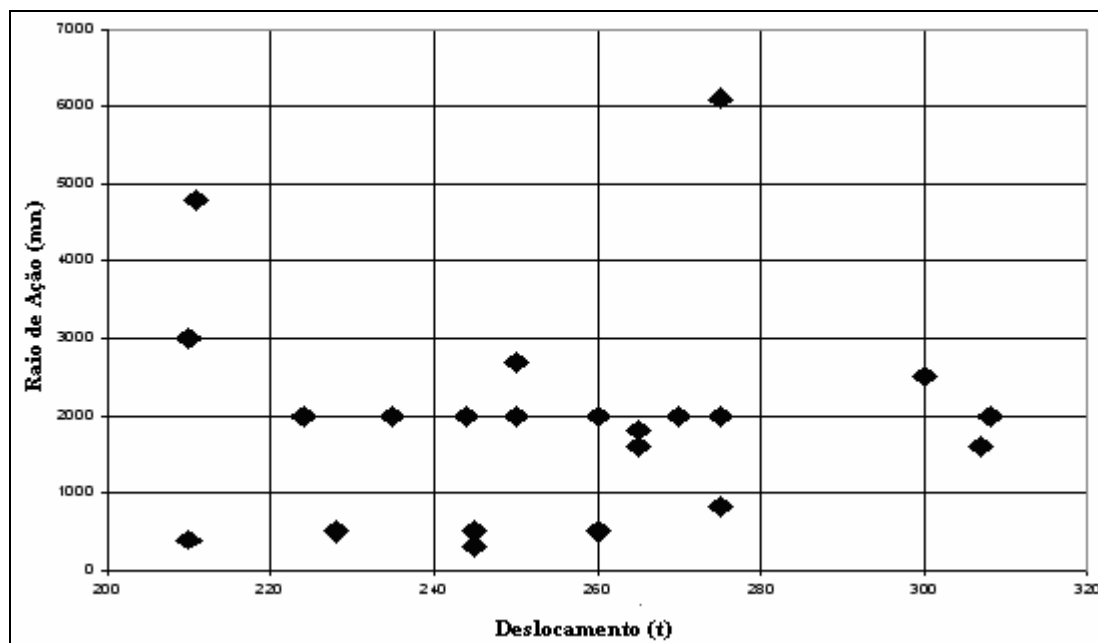


Figura 60 - Raio de Ação de vários navios patrulha em razão do deslocamento

Enquanto exercendo funções puramente de combate a embarcações de superfície, o patrulha submersível não irá além da plataforma (na sua concepção de relevo submarino). Entretanto, enquanto patrulha, suas atividades incluem interceptar navios que estejam sobre a plataforma marítima que exceda 200 milhas marítimas.

Com isso, fica claro que um raio de ação menor ou igual que 200 milhas marítimas (ZEE), quando submerso, é suficiente para o patrulha submersível exercer suas funções submarinas, pois deve ficar sempre parado em torno de um porto que se destina a defender e não em missões de patrulha. Aumentar o raio de ação submerso é extremamente oneroso ao patrulha submersível, pois implica considerável aumento de peso.

Quando exercendo funções de patrulha, na superfície, seu raio pode ser comparável ao dos navios patrulhas, que ficam na faixa sempre inferior a 3000 milhas, onde uma faixa razoável seria superior a 1000 milhas, valor que parece situar-se na média dessas embarcações.

3.3.7 RESUMO DOS REQUISITOS

Para cumprir suas missões, preliminarmente estima-se que o patrulha submersível deva ter:

Tabela 12 - Requisitos de projeto

Fatores de Projeto	Requisitos
Tripulação []	Mínima
Raio de Ação [milhas náuticas]	Superfície ≥ 1000 ; Submerso ≤ 200
Dimensões Principais	Menores possíveis
Custo	Menor possível
Velocidade [nós]	na superfície, máxima, ≥ 20 nós; mínima submerso, 3;
Silhueta Radar [m ²]	Pequena
Profundidade [m]	<3 m, suficiente para navegar na altura das ondas, ou maior ou igual que 200m, para ocultar-se no fundo
Configuração da Popa	Capacidade de pousar no fundo
Autonomia [dias]	máxima
Armamento []	Torpedos e metralhadoras

4 METODOLOGIA DE PROJETO

4.1 METODOLOGIA DE PROJETO

O projeto é um método científico para a solução de problemas mal definidos. No caso do Navio Patrulha de Formas Não Convencionais com Características Submersíveis (o Híbrido, ou Patrulha Submersível), a sua concepção teve seu processo criativo e o conseqüente processo de projeto dirigido e organizado, respectivamente, por uma técnica denominada Projeto com Foco na Solução (SFD, *Solution Focused Design*), melhor explicado em Schachter et al. (2005).

A técnica foi desenvolvida para auxiliar a organizar processos de projeto, lidando com sua natureza mal-definida (CROSS,1989) ao mesmo tempo em que se abre espaço para o processo criativo. Para isso, realiza um *brainstorming* em duas sessões em que tenta combinar o processo criativo de indivíduos do grupo com conceitos de otimização (sem seus métodos matemáticos), ou seja, a tecnologia e conhecimento formal das áreas de conhecimento técnico e prático envolvido. (SCHACHTER et al., 2005)

O processo se inicia com um grupo de pessoas que, após coletar informações mínimas essenciais ao problema (por exemplo, especificações, semelhantes, etc) procuram criar esboços iniciais (*sketchings*) com uma visão orientada à solução do problema (proposta de solução – síntese).

Num segundo passo, ocorre a elaboração individual de uma lista completamente aleatória das atividades que mais influenciam o processo de solução, bem como dos requisitos para sua execução, conhecidos como fatores de projetos.

O terceiro passo, consiste na classificação dos fatores segundo o papel que exercem no processo de solução: variáveis livres, VL, e variáveis dependentes, cujas modalidades são funcionalidade, F, configuração, C, desempenho, D, e restrições, R. Tal classificação obedece aos mesmos conceitos da otimização de funções em matemática.

O quarto passo é a construção de uma matriz de interação capaz de verificar interdependência entre cada fator e os demais.

O quinto passo é a elaboração de novos *sketchings*, pequenos esboços resumitivos das possíveis formas para solução do problema;

O sexto e último passo, é a construção do gráfico conhecido como fluxograma de projeto, em que se permite sintetizar a representação de um conjunto de atividades

que permite a construção de uma solução nova, arrojada, criativa e eficiente para o problema.

No caso do Patrulha Submersível, teve-se como parâmetro de partida a necessidade de construção de uma embarcação submersível para a defesa de pontos no oceano, fisicamente, ilhas ou portos e capaz de patrulhar. Até o aspecto submersão foi colocado em cheque durante o processo de brainstorming, pois o SFD tem como característica apresentar uma solução ao problema e não executar uma solução predeterminada.

4.1.1.1 LISTA ALEATÓRIA

Depois do brainstorming foi elaborada a lista seguinte: Tripulação; Raio de Ação; Velocidade; Autonomia; Potência e Propulsão; HCB (hidrostáticas, cruzadas e curvas de Bonjean); Estruturas; Peso Leve; Assinaturas; Baterias; Comportamento no Mar; Estabilidade; Forma; Munição e Consumíveis; Acomodação; Salvamento; Auxiliares; Compartimentação; Arranjo Geral.

4.1.1.2 LISTA DOS FATORES DE PROJETO CLASSIFICADA

Os fatores de projeto são, de acordo com suas classificações:

- (i) Variáveis Livres (dados de entrada): Tripulação; Raio de Ação; Velocidade; Autonomia, Salvamento e Auxiliares;
- (ii) Variáveis dependentes do Tipo F: HCB - hidrostáticas, cruzadas e curvas de Bonjean; Estruturas; Cálculo do Peso Leve;
- (iii) Variáveis dependentes do Tipo R: Assinaturas; Baterias; Estabilidade;
- (iv) Variáveis dependentes do Tipo C: Forma; Munição e Consumíveis; Salvamento; Compartimentação; Arranjo Geral;
- (v) Fatores de desempenho D: Potência e Propulsão; Peso.

4.1.2 MATRIZ DE INTERAÇÃO

A matriz de interação inicialmente proposta por Jones (1963) foi concebida partir de fluxogramas PERT. Essa matriz serve para relacionar os fatores de projeto e determinar sua interdependência e seqüenciação ao longo do processo de projeto. A prática deste processo ajuda a elucidar quais são os parâmetros que compõem cada fator e pode auxiliar na descoberta da existência e localização seqüencial de um fator não

pensado antes, pela interdependência e necessidade de seqüenciação. Também ajuda a identificar processos cíclicos internos ou grandes processos cíclicos de projeto.

Com a matriz de interação pode-se descobrir a melhor seqüência de projeto e gerar, em conseqüência, uma espiral ou o fluxograma de projeto, esse último, adotado aqui.

Tabela 13 - Matriz de Interação entre os Fatores de Projeto

FATORES DE PROJETO	Forma	Arranjo Geral	Potência e Propulsão	Estruturas	Baterias	Peso Leve	Estabilidade	Assinaturas	HCB	Compartimentação	Tripulação	Munição e Consumíveis	Raio de ação	Salvamento e auxiliares	Velocidade
Forma		+	+	+		+	+	+	+	+					
Arranjo Geral					+	+	+								
Potência e Propulsão e				+	+	+	+			+					
Estruturas						+	+			+					
Baterias						+	+								
Peso Leve							+								
Estabilidade															
Assinaturas															
HCB										+					
Compartimentação												+			
Tripulação														+	
Munição e Consumíveis e															
Raio de Ação															
Salvamento e auxiliares e															
Velocidade															

A matriz de interação foi gerada num estágio anterior do fluxograma de projeto e corresponde a uma versão preliminar. O fluxograma é bem mais detalhado que ela e corresponde ao processo de projeto efetivado.

4.1.3 SKETCHING

Apresentam-se, na Figura 61, os esboços (*sketchings*) que participam do *brainstorming*.

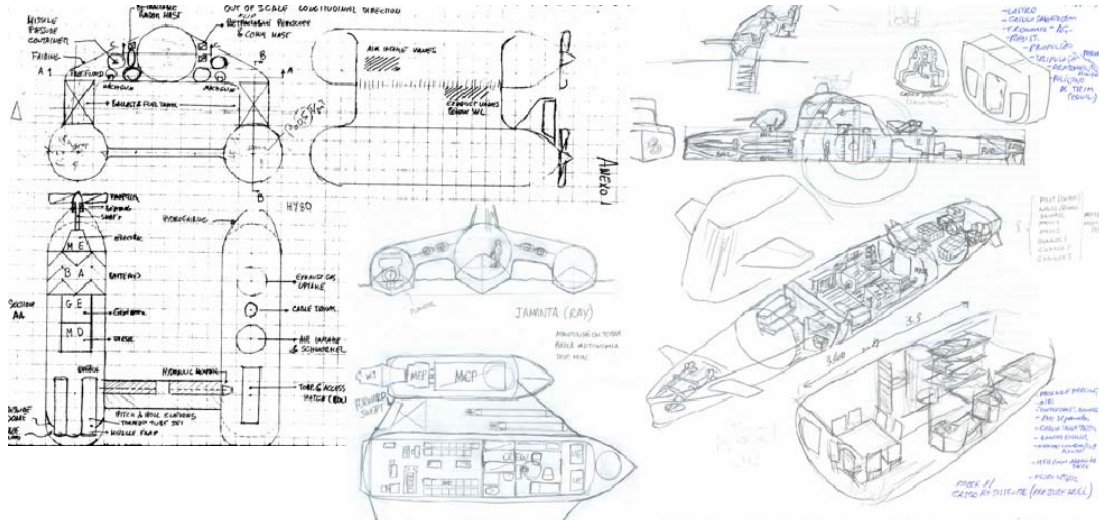


Figura 61 – Sketchings

4.1.4 FLUXOGRAMA DE PROJETO

O fluxograma de projeto indica a seqüência e interações entre as atividades. No presente trabalho o fluxograma evoluiu muito.

Primeiramente elaborou-se um fluxograma com o da Figura 62 e, então, o fluxograma da Figura 63.

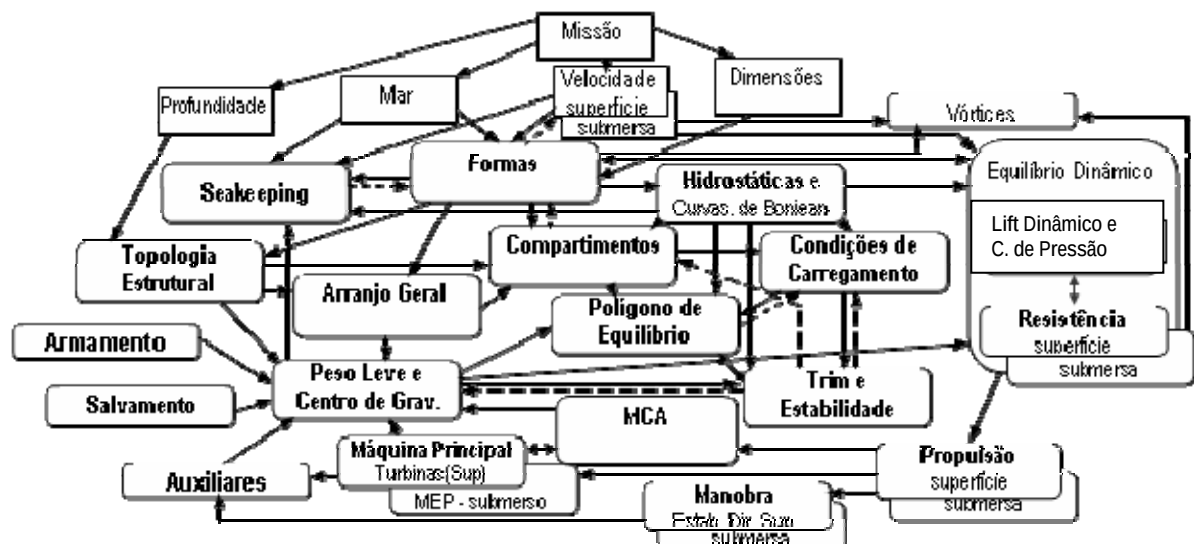


Figura 62 – Primeira versão do Fluxograma do Patrulha Submersível (SCHACHTER et al.,2005)

apresenta-se o fluxograma básico de projeto das versões do híbrido, que é o próprio fluxograma da versão V2A, explicado no item 5.2.

4.1.5 COMPOSIÇÃO DE ALTERNATIVAS

Tabela 14 - Mapa Morfológico (SCHACHTER et al., 2005)

Soluções Propostas	1 'Jamanta'	2 Planador mono casco	3 SWATH	4 Semi-Deslocamento	5 Hidrofólio
Tipo de Casco	Deslocamento	Planador (1,2)	Semi-Deslocamento (4)	SWATH (3)	Hidrofólio (5)
Suporte na superfície	Deslocamento (3,4)	Planador(1,2)	Planador + Hidrofólios (2)	Hidrofólios (5)	
Configuração		Mono Casco (2,4,5)	Multi Casco (1,3)		
Comportamento no mar		Forma do Casco (1,2,4)	Hidrofólios (2,5)	SWATH (3)	
Máquinas Principais	D-E (1,3,5)	G.T.-Elétrica (2,4)	G.T.-D-E (2,4)	Stirling (A.I.P.)	Célula de Combustível (A.I.P.)
Propulsão	Prop.+ R.Gear (todas)	Electric Pods (4)	Hidrojetos (2,4)	Hidrojetos+ R.Gear (2,4)	
Manobra	Leme (todos)	Pods (4)	Bocais (2,4)	Z Drive (5)	
Material do Casco	Aço (1,3)	Alumínio (5)	Compósitos (2,4)	Combinações (2,4)	
Carga Elétrica		Célula de Combustível (2,4)	Baterias + Gen. (todas)		
Manutenção		No porto (todos)	No mar		
Salvamento		Módulo Ejetável (2,3,4)	Compartimento seguro para a tripulação (1)	DSRV	
Estabilidade direcional Sub.		Forma do Casco(2,4)	Fólios (3)	Forma do Casco + Fólios (1,2,4)	
Emersão/Imersão		Lastro (2,3,4)	Fólios (1)	Lastro + Fólios (2,4)	
Modos de falha críticos de cada conceito)	1 ultrapassa volume deslocado	2 espiral divergente de peso/potência	3 maior silhueta, Má estabilidade direcional submersa ,emissão de vórtices	4 controle de peso;menos baterias; miniaturização	5 a 'square-cube law', exige fólios muito grandes

Nomenclatura: D-E – diesel-elétrico; G.T. –turbine a gás; Prop. – propulsor. R.Gear – redutora; Gen. – geradores;

A.I.P. – Propulsão independente do ar; D.S.R.V. – Veículo de Salvamento; Surf. – superfície; Sub. – submerso

As seções de *brainstorming* permitiram formular um número inicial de soluções para o problema o problema proposto, com foco na funcionalidade global. Estas variaram de cascos de deslocamento, planeio (um mono casco e um trimaran, 'Jamanta') e semi-deslocamento, até um SWATH e um hidrofólio.

A composição das soluções iniciais, com exclusão de algumas e associação de outras, deram origem às configurações que, de fato, foram investigadas no processo de projeto e se encontram na Tabela 16, seção 4.1.8.

As soluções iniciais formaram o conjunto de dados do mapa morfológico da Tabela 14 que permitiu uma primeira visualização do que se iria projetar.

A primeira linha da Tabela 14 representa as Sub-Funções or Características. A primeira linha contém as Soluções Propostas no *brainstorming* inicialmente . A parte interna contém os meios de se atingir essas características listadas horizontalmente. De

modo a saber quais características indicam a solução usada, algumas linhas deveriam conectar a solução aos meios de se lhe atingir, mas, por clareza de propósito, as conexões feitas na Tabela 14 são representadas por números. Assim como muitas combinações foram tentadas no processo de projeto para cada solução, há casos de mais de um meio por característica. A melhor solução, aquela que parecia ser melhor e depois de longos estudos foi adotada, é o conceito de semi-deslocamento (4), marcado em cinza e numerado com 4. Um Fluxograma Iterativo de Projeto inicial combinando as três configurações mais bem sucedidas foi montado com esses dados e mostrado na Figura 62. (SCHACHTER et al., 2005)

Após o *brainstorming* uma lista maior de possibilidades hidrodinâmicas para o casco foi abordada, de forma a garantir que a solução final fosse a melhor possível, nesse sentido é que o SES (apesar de dificilmente viável) foi incluído. Note-se, porém, que exceto para o SWATH, todas as versões já eram monocasco, decisão essa que foi produto do próprio *brainstorming*.

4.1.6 OPÇÕES HIDRODINÂMICAS DISPONÍVEIS

Para se justificar a escolha entre as opções de tipos de embarcações é interessante que se recorra ao conhecimento acerca das formas teóricas disponíveis, suas vantagens e desvantagens. Para entender essas diferenças é necessário considerar aspectos de resistência ao avanço das concepções de embarcações na superfície e submersas.

A resistência ao avanço do navio é uma força que pode ser adimensionalizada por $\frac{1}{2}\rho v^2 S_m$, no coeficiente C_t . A natureza física de suas componentes permite seu cálculo.

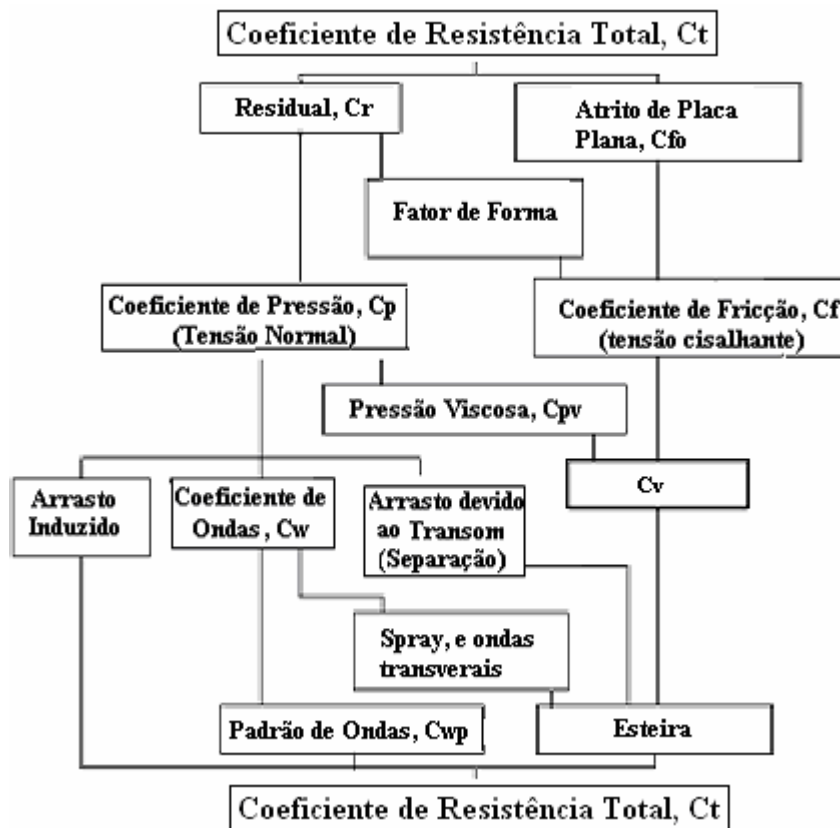


Figura 64 - Composição do Coeficiente de Resistência ao Avanço (adaptado de Couser et al.,1997)

Couser et al. (1997) entendem que a resistência ao avanço em um navio é resultado de pressões e tensões de cisalhamento, essas decorrentes apenas da viscosidade do fluido. Tradicionalmente, remontando a Froude, divide-se o coeficiente C_t em duas parcelas, uma de atrito de placa plana, C_{f0} , e outra residual, C_r . A primeira é calculada como a resistência de uma placa plana com a mesma área molhada do navio, conforme ITTC 57 ou Schoenher (ATTC). A outra parcela, resistência residual, envolve uma parcela invíscida correspondente ao padrão de ondas gerado pelo navio, C_w , e outra que é decorrente da tensão de cisalhamento atuar em um corpo tridimensional e que, portanto, difere de uma placa plana. O fator de forma é k , determinado experimentalmente.

$$C_t = C_f + C_r \quad (2)$$

$$C_r = k C_f + C_w \quad (3)$$

Couser et al.(1997) explicam, na Figura 64, que também compõem a resistência residual o arrasto induzido e o efeito da popa transom. O arrasto induzido é gerado pela diferença entre a direção da velocidade do fluido incidente no escoamento e a direção resultante com a composição dos vórtices gerados pelo próprio navio à

jusante. A popa transom representa uma quebra da linha de fluxo, o que ocasiona aumento de velocidade e conseqüentemente diminuição de pressão.

O arrasto induzido surge do entendimento do navio como uma asa de pequena razão de aspecto. Apesar de o coeficiente de arrasto induzido ser relativamente grande e proporcional ao quadrado do coeficiente de sustentação do casco, C_L , o ângulo de ataque é zero, o que torna essa parcela sempre próxima de zero.

O efeito da popa transom, nos navios onde a popa tem esse formato, é significativo, pois a queda de pressão é muito grande e com isso existe um considerável aumento da resistência ao avanço. Trata-se, entretanto, de preciosismo dividi-la da natural queda de pressão à popa que é conseqüência da superfície livre e da viscosidade. A própria Figura 64 representa isso, pois a une à parcela de esteira (*wake*).

Há, ainda, o spray e uma nova perda de energia resultante da quebra das ondas geradas pelo navio, ambas viscosas.

Todas as componentes de resistência são dependentes da velocidade e da geometria, mas não uniformemente. A resistência de ondas depende do número de Froude, Fn , definido como:

$$Fn = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (4)$$

Onde V é a velocidade, L é o comprimento do navio e g , a aceleração da gravidade

A resistência de atrito depende do número de Reynolds, Re , definido como:

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (5)$$

onde ν é a viscosidade cinemática do fluido.

Muito comum é a utilização ainda do número de Taylor, dimensional em lugar do número de Froude:

$$Taylor = V/L^{1/2} \quad (6)$$

com a velocidade, v , em nós e L em pés.

A parcela de ondas resulta de três trens de onda distintos. Um gerado pela compressão a montante do navio, outro a meio navio e outro pela depressão na popa. Quando os trens de onda de popa e de proa se somam, tem-se o pico da resistência de ondas.

A interferência construtiva entre popa e proa ocorre ao atingir a velocidade correspondente ao número de Taylor de 1.34, ou Froude de 0.4. Nesse ponto, o

comprimento dos trens de popa e proa igualam-se ao comprimento da embarcação e o navio encontra uma barreira ao desenvolvimento de mais velocidade.

Para superar essa barreira, criaram-se embarcações que desenvolvem baixa resistência de ondas. Quase todas elas partem de sustentação dinâmica, ou seja, parcela do peso é sustentado pela pressão dinâmica resultante da velocidade do escoamento. Essas embarcações costumam, então, ter grande relação Boca/Calado. O SWATH (*small waterplane area twin hull*), entretanto, minimiza a área de linha d'água de forma a superar essa barreira.

A influência do número de Froude na resistência ao avanço fica melhor entendida com o uso da Figura 65 adaptada de GILLMER (1970), em que aparece claramente uma barreira ao crescimento do número de Froude dos cascos puramente de deslocamento. Essa figura permite uma indicação qualitativa das formas mais eficientes hidrodinamicamente, antes mesmo de iniciar-se o projeto.

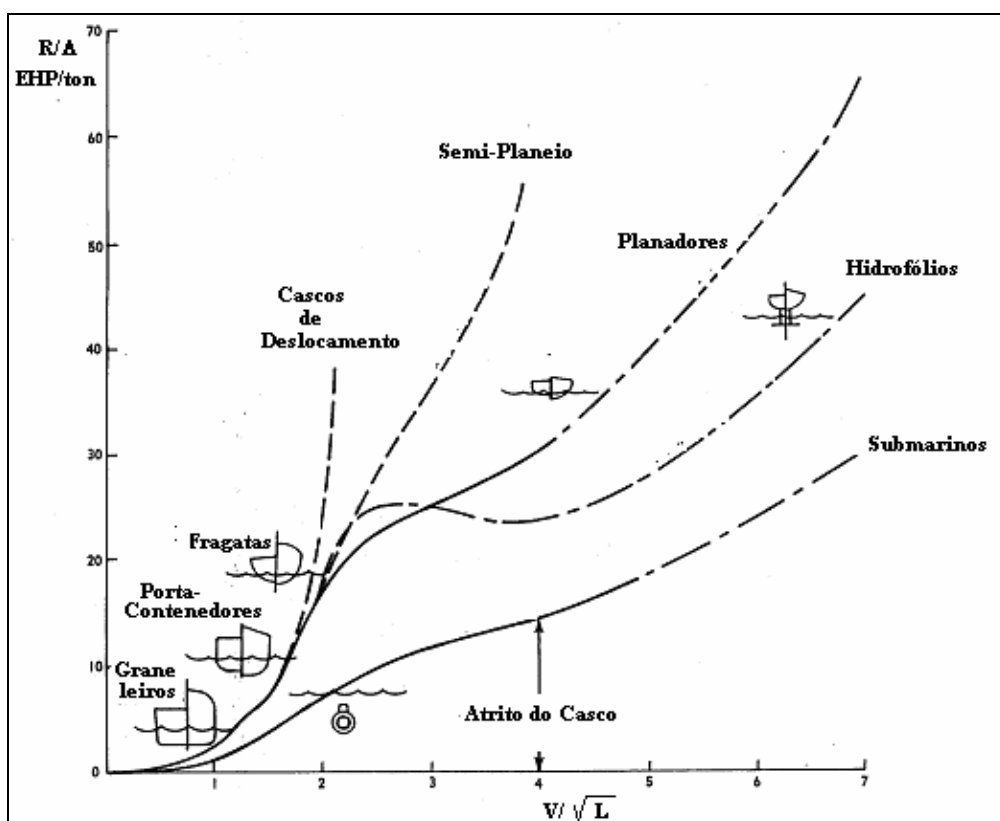


Figura 65 – Adaptada de GILLMER (1970)

4.1.6.1 AEROBARCO

Trata-se de um casco de planeio ao qual se acoplam, nas obras vivas, fólios (asas, ditas hidrofólios), com o intuito de afastar-se o casco da água, para reduzir a resistência ao avanço, minimizando o contato do casco com o meio fluido e com isso

eliminando a formação de ondas pelo casco e o atrito da superfície do casco com o fluido. Os hidrofólios que sustentam dinamicamente o peso da embarcação fora d'água, tanto podem aflorar à superfície, quanto podem operar completamente imersos. No primeiro caso, sendo secantes à linha d'água, são ditos secantes, no segundo caso, são ditos fólios submersos. A resistência encontrada pelo aerobarco é praticamente a resistência encontrada pelos seus fólios.

Os aerobarcos não encontram a barreira do número de Froude de 0.4, pois, praticamente, não geram ondas. Enfrentam o arrasto induzido e a parcela de fricção de seus hidrofólios e suportes. Atingem altas velocidades na superfície depois da descolagem (velocidade em que descola todo o casco d'água, passando a ser sustentado pelos fólios). Antes da descolagem, entretanto, os aerobarcos encontram a resistência de seu casco acrescentada àquela de seus hidrofólios, o que os fazem atingir menores velocidades que aquelas de embarcações que apresentem os mesmos cascos sem os respectivos hidrofólios, pois o efeito da diminuição da superfície molhada do casco pela ação da sustentação de seus fólios não compensa o incremento de resistência representada pelos fólios.

Como todo o peso da embarcação é sustentado pela parte submersa de seus fólios, a dimensão limite dessas embarcações é a envergadura dos hidrofólios, que crescem com o deslocamento. O espectro de mar limite, por sua vez, depende da distância entre o casco e a superfície da água (*gap*): se as ondas são maiores que o *gap*, então, o navio fica à mercê das ondas, caso contrário é transparente a elas.

Do estudo dessa configuração, pode-se adiantar que devido ao grande peso do casco resistente, não foi possível encontrar fólios de dimensões aceitáveis para sustentar a embarcação, em fenômeno análogo ao *square-cube law* inerente aos aerobarcos, que os inviabiliza para grandes dimensões ou densidades de carga. (BOGOSIAN NETO e SCHACHTER, 2004).

4.1.6.2 SWATH - SMALL WATERPLANE AREA TWIN HUL

É uma embarcação que reduz a resistência ao avanço minimizando a geração de ondas na superfície. Apresenta boa velocidade em números de Froude elevados, em comparação a cascos de deslocamento, sendo muito sensível ao trim em razão de sua pequena restauração.

4.1.6.2.1 SEMI-SWATH

É um navio idêntico ao SWATH que, entretanto, apresenta apenas um casco submerso. Tem maiores problemas de estabilidade e manobrabilidade em relação ao anterior, entretanto, apresenta-se com menor resistência ao avanço.

4.1.6.3 SES - SURFACE EFFECT SHIP

O SES (também chamado de *air cushion catamaran*) é um hovercraft de cascos laterais rígidos (BERTIN, BITTANTI e SAVARESI, 2000). Sustenta-se por um colchão de ar que fornece a pressão necessária para levantar o peso. Nele, o ar é insuflado continuamente a partir de ventiladores, o que aumentam o peso e custo da embarcação (BURDUN, e MAVRIS, 1998). Essa concepção exige grande complexidade para ser controlada.

O ar abaixo do SES funciona como uma mola sem amortecimento, que pode entrar em ressonância com o oceano, o que constitui uma fragilidade dessa concepção. (BURDUN, e MAVRIS, 1998).

4.1.6.4 CASCOS PLANADORES

Essas embarcações têm seu peso sustentado pela pressão dinâmica, ou seja, pela alta velocidade do fluxo sob a embarcação. A velocidade de saída do fluxo na popa da embarcação é tangente a seu casco (popa seca), o que impede a formação da onda de popa, permitindo fugir da barreira de 0.4 de Froude .

Esse tipo de embarcação apresenta menor custo, menor calado, porém com mau comportamento em ondas e má estabilidade direcional para estados de mar mais energéticos.

Do estudo dessa configuração, pode-se adiantar que esta avaliação resultou em uma espiral divergente de peso e potência em que a cada equilíbrio dinâmico encontrado, a potência necessária demandava motores mais pesados que os testados. (BOGOSIAN NETO e SCHACHTER, 2004).

4.1.6.5 CASCOS SEMIPLANADORES

O semiplaneio é um regime de escoamento em que há planeio sem variação perceptível de calado e área molhada, tendo, entretanto, sua velocidade deteriorada a partir de F_n de 0.7.

Normalmente utilizam-se linhas de séries sistemáticas como a série NPL, ou C de Hamburgo, criadas de modo a garantir o semiplaneio, que permitem a extrapolação dos resultados empíricos para a nova forma determinada.

Quando não há uma série sistemática, determina-se, com precisão razoável, a resistência ao avanço com os métodos estatísticos, como o de Holtrop (1984), que dão a liberdade de testar uma série de elementos de forma e valores L , B , T de forma a determinar a envoltória do deslocamento procurado. É essa a abordagem utilizada no trabalho.

4.1.6.6 FORMA DE SUBMARINO (GOTA OU CILINDRO)

A Figura 65 apresenta os vários tipos de navios e a resistência ao avanço (R) pelo deslocamento (Δ), de cada um deles, em função do número de Taylor. A alternativa mais econômica parece ser sempre o submarino. O comportamento no mar dos submarinos e sua estabilidade são qualitativamente melhores que os dos navios de superfície. Pergunta-se, então, por que não se constroem apenas submarinos, para as diversas finalidades marítimas?

A resposta é que o volume disponível para a carga a bordo dos submarinos (*payload*), por um lado, é muito pequeno, variando inversamente com a profundidade de operação, e, por outro lado, o ingresso de cargas a bordo é grandemente dificultado por se tratar de um navio com acessos estreitos, determinados pelos requisitos de estanqueidade e resistência a maiores pressões que os navios de superfície.

Outro fator é que o arranjo fica grandemente dificultado por esses veículos apresentarem formas circulares, o que ocasiona uma perda natural de volume. Além disso, a operação de um submarino é bem mais complexa que aquela de um navio de superfície e os riscos associados a avarias, bem mais elevados.

Também o calado dessas embarcações é naturalmente maior, dificultando o acesso a qualquer porto. Guerra (1964) apresenta um submarino de transporte de formas elípticas que minimiza os problemas de espaço a bordo e arranjo, mas continua sendo uma embarcação de difícil operação e detecção, o que a torna perigosa quando se consideram os riscos de abalroamento no mar.

No caso do patrulha submersível, particularmente, a forma de submarino apresenta o inconveniente de impor a utilização exclusiva da propulsão diesel elétrica, pois as turbinas não podem esnorquear. Além disso, o navio deveria navegar quase

sempre submerso, o que diminui muito a capacidade de patrulha nos oceanos, pois impede a utilização dos olhos humanos na navegação.

4.1.6.7 WIG (*WING IN GROUND EFFECT*)

O WIG é uma embarcação que se utiliza de asas (fólios) para descolar, entretanto, diferentemente do aerobarco, que permanece com os fólios parcial ou totalmente imersos, essa embarcação fica totalmente no ar, como um avião. As asas dessas embarcações têm menor envergadura quando comparadas às aeronaves, aproveitando-se do incremento de sustentação que surge em uma asa próxima do solo, dito efeito de solo (*wing in ground effect*). Atingem as maiores velocidades entre as embarcações, na faixa de 200 nós.

4.1.7 TABELA RESUMITIVA DAS POSSIBILIDADES DE PROJETO

Tabela 15 - Possibilidades de Projeto

Embarcação	Sust.	Vantagens	Desvantagens
Aerobarco	Din.	Bom seakeeping	Pequenos deslocamentos
		Alta velocidade depois da decolagem	Alta resistência antes da decolagem
		Boa resposta a explosões submarinas e a ataques de torpedos	Complexidade relativa da propulsão, construção e acabamento interno
		Boa área de deck (se catamarã)	Médio para alto custo
SES	ArSt	Alta velocidade	Alta consumo de energia (para manter-se elevado da água)
		Boa área para arranjar	Alto custo e complexidade
WIG	ArSt	Alta capacidade de Carga	Alto Custo
		Alta velocidade (250 nós)	Alta Complexidade
		Boa manobrabilidade	Grande Volume (asas)
		Baixa assinatura radar	Maior custo
		Capacidade de vôo sobre terra (algumas concepções)	Mau comportamento em ondas
Planadores	Din	Maior capacidade de carga que o aerobarco	Mau comportamento em mares mais pesados
		Comportamento moderado em mar moderado	Manobrabilidade grandemente afetada por mares mais pesados
		Boa velocidade (com recorde de 136 nós)	$V_{\text{planador}} < V_{\text{aerobarco}}$ em ondas
		Menor calado e custo	
		Boa estabilidade transversal	
SWATH	St.	Bom seakeeping	Grande calado e maior peso estrutural
		Bom espaço para arranjar e menor custo estrutural	Maior resistência ao avanço por nó (velocidade máxima 30 nós)
		Maior velocidades que navios convencionais	Sensível ao trim, em razão da pequena restauração
		Baixa vibração e ruído	Pequena capacidade de carga
Semiplanador	Din	Alta capacidade de Carga	Média Velocidade
		Boa manobrabilidade e <i>seakeeping</i>	

Onde Sust é sustentação , Din é pressão dinâmica , St é pressão estática, ArSt é pressão estática do ar.

4.1.8 QUADRO RESUMITIVO DAS INVESTIGAÇÕES DE PROJETO

A fim de atender a necessidades conflitantes de grande velocidade na superfície e navegação submersa, algumas configurações (qui denominadas versões) foram estudadas com nível de detalhamento variado, como mostra a Tabela 16 e a Figura 66 (versão ganhadora de grande profundidade) e Figura 67 (versões de baixa profundidade).

A versão *aerobarco* chegou a ser cogitada paralelamente à versão de semiplaneio. A idéia era a utilização de um booster de ar comprimido capaz de oferecer a potência necessária para se descolar e aproveitar a região da curva de resistência após a descolagem. Essa idéia foi abandonada em virtude do perfil de operação da embarcação que é, na maior parte do tempo, muito aquém do descolamento em patrulha (aproximadamente 10 nós), o que a faria gastar sempre mais combustível.

A versão *SES* foi abandonada em virtude do grande nível de ruído que gera a parte elástica de suas estruturas quando submersas, bem como porque esse veículo não se presta a um baixo consumo de energia em baixas velocidades.

A versão *WIG* foi descartada porque exige um grande volume e materiais muito leves para “voar”, ou seja, totalmente incompatíveis com o requisito de submersão, que exige estruturas muito robustas para resistirem à pressão.

A versão *SEMI-SWATH* é bem menos estável que a *SWATH* e apesar de apresentar boas características de resistência ao avanço, seu desempenho em manobra na superfície e submerso é bem ruim. A capacidade de carga dessas embarcações, sua maior vantagem com relação aos submarinos perde-se se tiver de submergir, por isso também foi abandonada.

A versão *SWATH* (assim denominada aquela que apresenta casco resistente cilíndrico) é uma excelente opção para a superfície, mas perde em estabilidade direcional no plano vertical, e foi investigada. Dessa versão se obtiveram inclusive o arranjo geral, o peso e cálculo de resistência ao avanço. Parece interessante relatar que o ganho adicional de potência pela introdução do segundo casco cilíndrico não representa nenhum ganho sensível em velocidade com relação à versão *SEMI-SWATH*.

Resta a investigação acerca das possibilidades: planeio e semiplaneio. Parte delas, dimensiona-se para operar em baixa profundidade (maior ou igual que 3m), parte delas para profundidades da plataforma continental (200 m).

As versões de sustentação dinâmica com casco hidrodinâmico, de planeio ou semiplaneio, e casco resistente cilíndrico receberam nomes, iniciados com a letra V e

numerados de 1 a 3. As versões V1  e V3  foram abandonadas e prosseguiu-se com a versão V2, modificada para hidrojato, V2A.

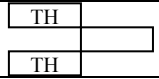
As versões V4 , V5  e V5A  foram apenas delineadas, a partir de um novo requisito de pequena profundidade de operação submersa 3m.

As versões V1 , V2  e V3  são analisadas com uma envoltória de casco planador e com uma envoltória de casco de semiplaneio, sendo que a última se prova mais eficiente.

A versão V5  é uma versão com o casco de formas simples e quinadas, como as embarcações de cascos planadores para operar no regime de planeio. A versão V5A  tem o mesmo casco da versão V2A , mas sem o casco cilíndrico e apresentando uma turbina a mais o que permite aumentar sua velocidade máxima na superfície.

A versão 6, V6 , trata-se de um SWATH que submerge completamente, para pequena profundidade. Essa embarcação apenas se oculta sob as ondas.

Tabela 16 - Versões Avaliadas

	Casco	C	T	H	J	S	Ideograma
Aerobarco	semiplaneio	1	-----	-----	-----	C	-----
Semi-SWATH	deslocamento	1	-----	-----	-----	C	-----
SWATH	deslocamento	3	0	2	0	P	
V1 (SP 1C1TH)	semiplaneio	1	1	1	0	A	
V2 (SP 1C2TH)	semiplaneio	1	2	1	0	A	
V3 (SP 2C2TH)	semiplaneio	2	2	1	0	A	
V2A (SP 1C2TJ)	semiplaneio	1	2	0	3	P	 ou 
V4 (LP sC3TJ)	planeio	0	3	0	3	D	
V5 (LP sC2TJ)	planeio	0	2	2	1	D	
V5A (SP sC2TJ)	semiplaneio	0	2	2	1	D	
V6 (SW 2C0TH)	deslocamento	1	0	2	0	D	

Onde C - Cilindro Resistente, T – Turbina, H – hélice, J – hidrojato S- *status* sC – inexistência de casco cilíndrico resistente, e 1C, 2C 3C, – um, dois ou três cascos cilíndricos resistentes, SP –casco de semiplaneio, LP – casco de lancha (planeio) e SW – casco tipo SWATH.

Na Tabela 16, as colunas indicam C – Cilindro Resistente, T – Turbina, H – hélice, J – hidrojato S – *status*. A coluna S indica o ponto em que chegaram os trabalhos investigativos: C - cancelada, A – apenas arranjada, D – delineada (projetada sem alguns fatores de projeto – p.e., estabilidade, comportamento em ondas,

manobrabilidade, etc.), P – projetada: projeto preliminar concluído. A coluna Ideograma na Tabela 16 procura acrescentar um ícone para facilitar o processo mnemônico.

O motivo de abandono das versões V1  e V3  é que os cascos resistentes internamente apresentam a necessidade de uma peça capaz de dar continuidade estrutural à configuração. Essa peça, juntamente com as calotas, são um gasto em peso desnecessário. Outra razão para abandono dessas configurações é que se faz necessário prover mais penetrações no casco resistente de forma a permitir inspeções, o que também ocorre com o SWATH, que vai a alta profundidade. Tudo isso são complicações que devem ser evitadas.

A versão V1  não atingiu a velocidade que se pretendia, porque carrega muito pouca potência. A baixa relação peso/potência de uma turbina adicional compensa sua instalação a bordo.

A versão V2  é inviável, porque o ângulo da linha de eixo obriga o hélice a ficar muito a ré ou afundado e, além disso, a turbina exige uma grande razão de redução, o que nos conduz a versão V2  modificada para hidrojato, V2A , em tudo idêntica a V2 , exceto pela propulsão.

A versão V4  apresenta a maior velocidade na superfície entre todas as versões, porque carrega 3 turbinas. Parece um ótimo navio patrulha que pode submergir. Suas formas de casco planador permitem fácil construção em qualquer ponto do litoral.

A versão V5  é diferente da V5A  no que se refere a dimensões. Adotam chapas planas com quinas e entende-se que ambas podem ser versões melhoradas no futuro para navegar a menores velocidades e com baixo custo operacional.

A versão V6  tem requisitos diferentes das demais por não possuir vela, com isso não esnorqueia, utilizando-se da ocultação sob águas apenas de forma estática.

Nas versões V4 , V5  e V5A , calculou-se a estrutura pela teoria de chapas finas com reforçadores. Isso significa que foram calculadas como se fossem navios de superfície que estivessem submetidos a uma pressão de 8 m de coluna de água em seus conveses superiores, o que significaria que o fundo dessas embarcações experimentaria um aumento de pressão igual à coluna de água com altura igual altura em metros do pontal do navio.

O peso estrutural influencia grandemente o projeto dessas embarcações. Percebeu-se, que o planeio na superfície, necessário para se atingir uma velocidade

maior que aquela dos antigos submersíveis, é grandemente dependente do peso que é mais bem suportado pelos cascos de semiplaneio, que conseguem superar as dificuldades associadas à resistência de ondas, sem perder a vantagem de pequena área molhada submersa (de quem depende basicamente a resistência em imersão).

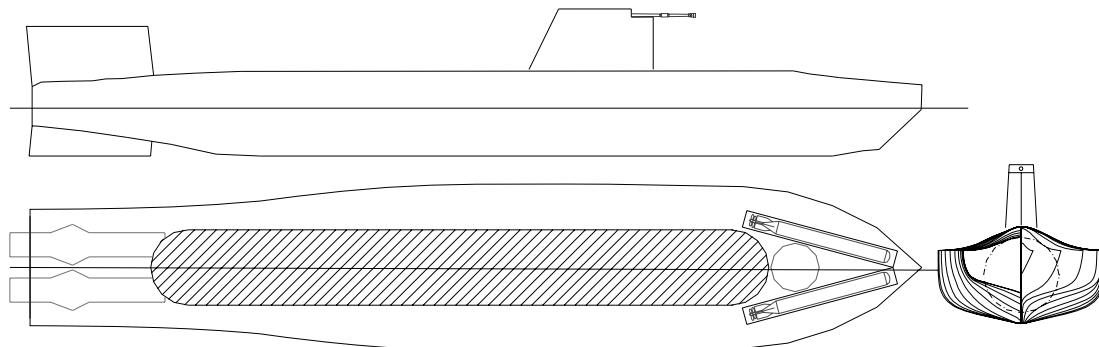


Figura 66 - Versão V2A

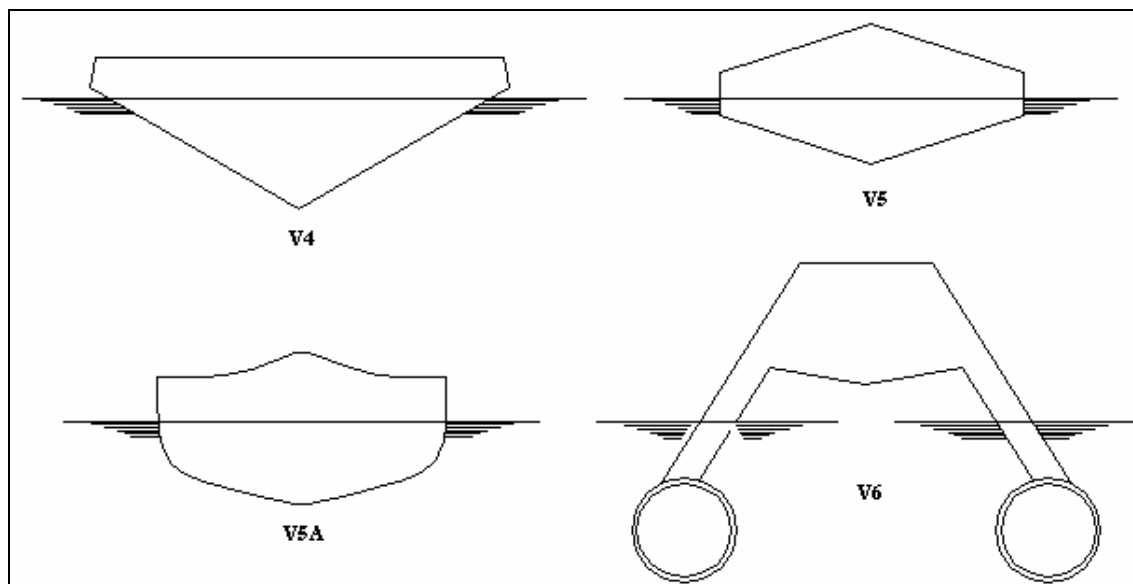
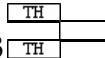


Figura 67 – Seções Mestras das versões V4 a V6

5 PROCESSO DE PROJETO

5.1 PARTICULARIDADES DO PROJETO DO PATRULHA SUBMERSÍVEL

Trata-se aqui do projeto das versões SWATH_{oo} e V1 , V2 , V3 , V2A , V4 , V5 , V5A , V6 , ou seja, das embarcações com casco de planeio ou semiplaneio e das versões SWATH, para pequenas profundidades ou para profundidades da plataforma continental.

A embarcações de sustentação dinâmica (cascos de planeio e semiplaneio) têm um projeto sensível ao peso, assim como os SWATHs. Os primeiros de modo a garantir o regime de escoamento e o último para garantir a flutuabilidade e trim. O projeto dos veículos submersíveis, ao contrário, apresenta-se sensível ao volume, pois, qualquer volume aumenta consideravelmente a resistência ao avanço e o lastro necessário e, secundariamente, buscam a mínima área molhada, para minimizar a resistência e a axissimetria, para garantir boa manobrabilidade quando submerso e, simultaneamente, baixo nível de ruídos.

O navio patrulha de formas não-convencionais com características submersíveis é uma concepção que tem duas naturezas: a primeira de um navio de superfície; a segunda, a de uma embarcação que submerge. Isso implica ser simultaneamente sensível ao peso e ao volume, e, secundariamente, buscar a área mínima e a simetria com relação a um plano horizontal, pois não consegue ser axissimétrico, em virtude de suas formas de navio de superfície.

Destes limitantes, o peso é mais importante, influenciando diretamente na potência instalada e só podendo ser determinado depois de determinada a estrutura, o que muitas vezes faz o processo de projeto desembocar em uma espiral peso-potência divergente.

O volume é a restrição que deve se fazer presente a cada instante, pois é a garantia de que os equipamentos escolhidos estão sendo carregados pelo casco. Assim, deve-se ter, um volume resistente mínimo que tal que se possam garantir as áreas de serviço e habitáveis a bordo.

Uma abordagem tradicional para o projeto seria escolher-se um volume resistente mínimo, estimar-se o seu peso, ou seja, estimar-se um peso preliminar que seja capaz de permitir o dimensionamento de todo o resto do navio, num processo muito semelhante ao proposto por Manning (1964), que inicia o projeto a partir do peso preliminar.

Aplicando-se o *projeto com foco na solução* de Schachter et al. (2004) pode-se partir diretamente para o cálculo de peso, via arranjo dos equipamentos a bordo. Nessa fase de projeto, entretanto, em que não se conhecem todos os equipamentos de bordo é mais seguro comparar-se e completar-se a estimativa do peso preliminar a partir de bancos de dados de grupamentos de peso, como os SWBS (STRAUBINGER, CURRAN E FIGHERA, 1983). A combinação da estimativa via arranjo, com os acréscimos de fatores imponderáveis nessa fase foi o que foi adotada nesse trabalho.

O requisito secundário de área molhada submersa mínima é conseguido minimizando-se a envoltória do volume de pressão, o que significa a eliminação de apêndices e, sempre quando possível, optar-se por formas suaves, pois maximizam o volume para uma dada superfície envolvente.

Como se disse, pela natureza de veículo submersível é preferível ainda uma simetria com relação a um plano de horizontal, para melhorar a manobrabilidade quando submerso e, simultaneamente, baixo nível de ruídos. Dificilmente pode ser atingida pelas versões que carregam o casco resistente cilíndrico, pois a simetria exige um aumento desnecessário de volume, que deve ser minimizado. Isso explica porque os antigos submersíveis eram sempre assimétricos. As formas sem casco interno cilíndrico apresentam maior liberdade e um arranjo adequado pode satisfazer esse requisito.

A simetria, então, não pode ser obtida para as configurações hidrodinâmicas do tipo SWATH. O nível de ruídos e manobrabilidade continuam se beneficiando da simetria, assim, cria-se uma incompatibilidade em essência que acaba se constituindo numa fragilidade intrínseca dessa concepção.

Por fim venceu a configuração V2A para profundidade de 200 m. Nas baixas profundidades foram estudadas ainda a V4, V5 e V6, a última sem vela.

5.2 PROCESSO DE PROJETO DAS VERSÕES SWATH E V1 A V3

O processo de projeto das versões SWATH e V1 , V2 , V2A , V3  é o processo de determinação de um ponto viável apresentado em Bogosian Neto e Schachter (2004). Para melhor compreendê-lo é interessante a observação do fluxograma de projeto do item 4.1.4, Figura 63.

A primeira atividade consiste na determinação do peso preliminar com base nas áreas necessárias para a realização dos trabalhos de bordo. Enquanto em navios de superfície, a conversão dessas áreas em peso fica extremamente dificultada, no caso do híbrido, existe sempre um volume associado a cada área (área x pé-direito do compartimento), que igual é o volume de água por ele deslocado, assumindo-se flutuabilidade neutra.

Na superfície, o casco resistente deve ser equilibrado por uma envoltória hidrodinâmica que o vê como uma carga, um *payload*. Assim, o deslocamento na superfície deve ser igual ao peso do casco resistente que varia muito pouco com relação ao seu peso submerso, o que permite dizer que o peso do casco resistente submerso deve ser igual ao peso na superfície. Assim tem-se o deslocamento preliminar.

A partir de regressões estatísticas sobre cascos hidrodinâmicos semelhantes, o deslocamento preliminar permite obter uma potência instalada preliminar para uma certa velocidade. Com ela, escolhem-se os motores e, então, realiza-se o arranjo preliminar do casco resistente.

O arranjo preliminar do casco resistente, além dos motores, prevê a alocação de muitos outros equipamentos e, portanto, estabelece os limites mínimos das dimensões principais.

As formas hidrodinâmicas da embarcação surgem como as superfícies mínimas que envolvem o volume em torno do casco resistente. Essas superfícies são determinadas a princípio pela experiência do projetista.

Entre os vários cascos hidrodinâmicos viáveis, ou seja, aqueles que podem conter o volume resistente, um deve apresentar uma resistência ao avanço menor que os demais, na superfície. Esse será o casco hidrodinâmico escolhido para envolver a versão em estudo. A resistência ao avanço é calculada para cada casco candidato, dessa vez com o uso de Holtrop (1984), Savitsky (1964), ou Mitchel, conforme o caso.

O casco que apresenta a menor resistência ao avanço tem, então, suas linhas definidas e pode servir para o cálculo de curvas hidrostáticas, de Bonjean e Cruzadas de Estabilidade.

Nesse ponto, calculam-se os sistemas auxiliares, muitas partes desses sistemas (e mesmo alguns completos) não aparecem no arranjo, pois ainda estão indefinidos, como por exemplo, a fiação das comunicações; entretanto participam do cálculo de pesos e centros, cujo valor, mesmo aproximado, é crucial para o projeto conceitual. O cálculo dos volumes e dos pesos dos sistemas auxiliares tem o intuito de prever se de fato o navio está sendo capaz de carregar aquilo a que se propõe, ou seja, se é, de fato, viável.

Paralelamente, é possível calcular-se a estrutura. Evidentemente a estimativa estrutural fica melhor quando já se determinaram o posicionamento e o peso dos sistemas de máquinas e auxiliares, pois a estimativa inicial de peso continua sendo aprimorada durante o processo.

A estrutura determina os escantilhões que fazem o navio resistir às solicitações do mar e dos equipamentos. Como consequência, o peso desses escantilhões é introduzido no cálculo de pesos e centros, fazendo-o variar com relação a sua estimativa inicial.

O novo peso permite novo cálculo da resistência ao avanço. Nesse momento, é possível realizar-se a integração casco-hélice-motor e determinar-se a nova potência requerida, ou melhor, achar o valor de velocidade que corresponde à potência instalada.

O volume de combustível a bordo é limitado pelo volume disponível no arranjo para os tanques, de um lado, e do outro, pelo peso máximo passível de ser carregado que garanta a velocidade máxima de projeto.

As máquinas, que fornecem a potência instalada, estabelecem o consumo de combustível nessa velocidade anteriormente determinada. Além disso limitam o espaço a bordo com suas exigências de óleo lubrificante, separadores e demais volumes necessários a seu funcionamento.

Nesse momento, o raio de ação surge do volume de combustível carregado e do consumo dos motores.

Outros tanques são necessários, como o tanque de aguada, mas, em especial, os tanques de lastro de forma a garantir a submersão.

O processo de determinação desses tanques é necessário para se poder garantir a estabilidade estática submersa que é verificada no polígono de equilíbrio. A estabilidade e os tanques surgem de um processo grandemente iterativo.

Nesse ponto termina a exeqüibilidade do projeto, e pode-se dizer que ele seja viável.

Depois de garantir-se sua estabilidade, calculam-se as características que não apresentam restrições de exeqüibilidade ao projeto, ou seja, influenciam em seu desempenho, mas não inviabilizam, como a manobra e o comportamento em ondas.

5.3 PROCESSO DE PROJETO DAS VERSÕES COM CASCO RESISTENTE DE FORMA NÃO CILÍNDRICA (MONOCASCO, V4, V5 E V5A)

O projeto das versões em que o casco resistente é o próprio casco hidrodinâmico da embarcação (versões monocasco) aproveita a compactação e miniaturização das versões com casco cilíndrico, mantendo certos fatores de projeto por se considerarem fatores já otimizados. O conjunto dos fatores de projeto que não se alteram foi denominado *hipótese básica*. Constituem a *hipótese básica*:

- (i) Tripulação de 6 homens;
- (ii) Lista de equipamentos;
- (iii) Turbinas e diesel geradores;
- (iv) O conjunto de baterias;
- (v) O sistema de combate, eletrônico e de comunicações;
- (vi) Sistema de respiração;
- (vii) Parte dos Sistemas Auxiliares.

A *hipótese básica* parece bem razoável. Ela condicona o peso do submersível. O arranjo geral define as dimensões principais desse navio.

As versões V4, V5 apresentam um navio com formas em V (*Deep V*), com ângulo de pé de caverna de 30°, pois é mais fácil de ser construída. Apresentam um baixo calado e um pequeno comprimento que permitem a navegação fluvial, um ponto positivo dessas concepções.

Essa forma condiciona o comportamento dinâmico da embarcação na superfície e um comportamento completamente novo submerso, entretanto, de fácil previsão.

As versões submersíveis V4 , V5  e V5A  podem, então, ser estimadas segundo as seguintes hipóteses, além da *hipótese básica*:

- (i) Estudo de sensibilidade de resistência ao avanço, realizado nos itens 5.13.1.1 e 5.13.1.2;
- (ii) Arranjo preliminar do interior fixa as dimensões principais das embarcações;
- (iii) Arranjo geral dos equipamentos
- (iv) Estimativa do volume dos tanques, para possibilitar a submersão.

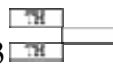
5.4 PROCESSO DE PROJETO - VERSÃO V6

Segue-se o mesmo processo de projeto das versões anteriores, estimando-se o navio a partir do peso preliminar, com variações para mais ou para menos em função do peso estrutural. A estrutura é preliminarmente estimada com base na teoria de chapas finas e vigas, para o habitáculo, na plataforma, e pela teoria de cascas esféricas para os torpedos, com seções circulares.

Além disso, conservam-se, como nas versões V4 , V5  e V5A .

- (i) Tripulação de 6 homens;
- (ii) Lista de equipamentos;
- (iii) O sistema de combate, eletrônico e de comunicações;
- (iv) Sistema de respiração;
- (v) Parte dos Sistemas Auxiliares.

Opta-se por não carregar a vela, pois o SWATH é naturalmente mais alto que os navios monocasco o que, se adicionado à altura da vela, faz com que o navio fique grande demais para ocultar-se sob as ondas. A falta da vela impede o esnórquel, mas o navio pode navegar com pequena borda livre de forma a reabastecer as baterias. O que se pretende nessa versão é apenas ocultar-se em um ponto fixo, o que se considera vantajoso.

Diferentemente das versões V1 , V2 , V2A , V3 , V4 , V5  e V5A  não carrega turbinas, nem hidrojetos. O arranjo com motores elétricos permite deslocar o centro de gravidade com ganhos em estabilidade, além disso, o fluxo em torno do hélice é melhorado pela configuração torpédica da parte submersa do casco.

Outra razão de não se utilizarem turbinas é que, em razão da grande profundidade do arranjo com turbinas os dutos são muito grandes, muito distantes do contato com a atmosfera. Isso implica que os canais de gases venham a crescer na escora do SWATH, inviabilizando o espaço para tanques.

Considera-se que o comportamento no mar dessa embarcação seja satisfatório *a priori*, em virtude de que os cascos SWATH têm um bom comportamento no mar.

Reduz-se a plataforma da V6  ao máximo, com isso, esse navio se torna um SWATH menos eficiente, pois a grande área de convés fica prejudicada, entretanto, melhora-se o desempenho submerso.

5.5 DESLOCAMENTO PRELIMINAR

O deslocamento preliminar surge como o peso que essa embarcação deve ter para cumprir a funcionalidade de patrulha na superfície e submergir. Para obtenção desse deslocamento preliminar, estimam-se as áreas necessárias à funcionalidade, arbitra-se um pé-direito mínimo e, com isso, um volume. Desse volume surge o peso preliminar.

Um princípio de projeto é dotar os novos navios de áreas de serviço e habitáveis semelhantes às existentes nos navios em operação, mas adequadas ao progresso tecnológico e a outras variáveis pertinentes (tais como a tripulação), de forma a possibilitar ao novo meio o cumprimento de sua missão ou funcionalidade, pois se o navio existente a cumpre, isso significa que o novo navio iria cumpri-la.

Pensa-se ser razoável, portanto, iniciar-se o projeto dessa embarcação a partir de um estudo de áreas que quantifique o necessário para o cumprimento de sua funcionalidade.

Por suas características submersíveis, a área interna mínima do *patrulha de formas não convencionais com características submersíveis* é aquela mínima de um navio patrulha diminuída das parcelas resultantes de evolução tecnológica. Esse é o espírito do estudo de áreas a seguir. Note-se que toda a área do *híbrido* deve estar protegida de pressão.

O casco resistente é o elemento que efetivamente pode ser usado para arranjo, pois o restante estará sujeito a alagamento de alta pressão. Isso impele o dimensionamento da embarcação para o arranjo geral do casco resistente, no sentido de torná-lo o mínimo necessário à inserção e manuseio dos equipamentos e dos espaços para circulação.

As versões sem casco resistente cilíndrico podem se aproveitar do arranjo encontrado para o casco cilíndrico e conformá-lo adequadamente, o que torna esse estudo de grande importância.

5.5.1 MODIFICAÇÕES DECORRENTES DO USO DO HIDROJATO

O hidrojato ocupa menor espaço que o conjunto hélice-redutoras no interior da embarcação de forma que o arranjo inicial criado com hélice resulta num casco resistente mais comprido que esse mesmo arranjo com hidrojatos, isso implica um conjunto mais leve.

5.5.2 ÁREAS DO HÍBRIDO

O caráter do estudo de áreas é apenas de determinar um valor preliminar capaz de orientar o arranjo e determinação das dimensões principais do navio. As áreas necessárias para o híbrido podem ser estimadas por extrapolação dos espaços de serviço, de equipamentos e de repouso, obtidos dos valores dessas mesmas áreas em Silva et al. (1996b), Takimoto e Oliveira (1999) e em Loire (1989). A Tabela 17 apresenta o conjunto das áreas estimadas e fator de estimativa:

- (i) deslocamento, $\Delta = \text{deslocamento}_{\text{híbrido}} / \text{deslocamento}_{\text{ref}}$;
- (ii) potência instalada, $\text{pot} = \text{potência}_{\text{híbrido}} / \text{potência}_{\text{ref}}$;
- (iii) tripulação, $\text{trip} = \text{tripulação}_{\text{híbrido}} / \text{tripulação}_{\text{ref}}$;
- (iv) autonomia, $\text{aut} = \text{autonomia}_{\text{híbrido}} / \text{autonomia}_{\text{ref}}$.

Tabela 17 - Estimativa de áreas

Compartimentos	Estimativa
Resistentes à Pressão	
Frigorífica	trip
Cozinha	trip
Instrumentos do sonar	Δ
Alojamentos	trip
Passadiço/Comando	trip
Banheiro	trip
Secretaria	desprezada
Escoteria	desprezada
Paiol da Máquina	Δ
Paiol de Munição	desprezada
Estação rádio	desprezada
CCM	pot
Praça de Máquinas	pot
Compartimento de Baterias	Área do elemento/potência
Máquina do Leme	Δ
Tanques no casco resistente	
Água Potável	trip/aut
Óleo Lubrificante	pot
Séptico	trip/aut
Unidade de Tratamento de Esgoto	trip/aut
Total Resistente	153.3 m³
Não resistentes à Pressão	
Paiol da Amarra	Δ
Tijupá e COC	Δ
Subtotal não resistente	291 m³

Onde o subíndice Híbrido significa o Navio Patrulha de Formas Não Convencionais com Características Submersíveis

Os valores pertinentes ao *híbrido* foram calculados para a velocidade submersa de 7 nós; o deslocamento submerso de 500 t, a potência estimada de 300 kW; tripulação de 6 homens; a autonomia de 5 dias. Compartimentos comuns em navios de guerra

como secretaria, escotaria, paiol de munição e estação rádio foram desprezados, pois hodiernamente já é possível uma redução desses compartimentos com emprego maciço de tecnologia através de um arranjo conveniente num processo interativo de projeto.

Em virtude da dificuldade de arranjo causada pelo formato cilíndrico, de posse do valor de 153.3 m^3 e utilizando-se do fator de perda de áreas, calculado em 63% (Apêndice C), estima-se que o navio precisa de 243 m^3 . Nota-se, de pronto, que um navio que não tenha casco cilíndrico tem a vantagem de necessitar de menos área resistente e, portanto, tenha dimensões menores, apesar de necessariamente ter de operar a menores profundidades.

Em fase posterior do projeto, percebe-se, entretanto, que a substituição do hélice pelo hidrojato reduz a área interna do casco resistente. O casco resistente de 31 m encontrado para a versão V2  cai para 25 m na versão V2A  (com hidrojato), o que representa diminuição em volume de 17 %.

5.5.3 DIMENSÕES PRINCIPAIS DO VOLUME RESISTENTE À PRESSÃO

O item 5.5.2 estima o volume em 243 m^3 , em função das áreas necessárias ao cumprimento da funcionalidade da embarcação. Nas versões monocasco, o volume calculado serve como parâmetro de partida para uma envoltória hidrodinâmica, que será a que minimiza a resistência ao avanço.

Nas versões que apresentam um volume cilíndrico, por outro lado, não interessa a resistência ao avanço, pois há um casco exterior de bom formato hidrodinâmico, ou seja, bem carenado e minimizante da resistência ao avanço. O volume interior, por outro lado, é cilíndrico por razões de resistência estrutural.

A formas esféricas e cilíndricas são as que apresentam o mais alto grau de resistência à pressão. Assim, o casco resistente adota a forma esférica a vante e a ré da parte cilíndrica, esta que constitui seu corpo médio.

Para determinar a forma cilíndrica, basta determinar dois parâmetros: o diâmetro resistente (D) e seu comprimento (L_{cr}).

Comprimento e diâmetro são ambos minimizados e achados de forma racional, pois minimizam peso e custo, e é esse o escopo desse item.

5.5.3.1 VERSÃO DUPLO CASCO: PESO ESPECÍFICO DO CASCO RESISTENTE (V1 ,V2,V3)

Os corpos submersos estão submetidos a duas forças: peso que é uma força de campo devida à gravidade; e empuxo que é uma força de contato devida à pressão. Caso o peso seja menor que o empuxo o corpo tende a subir, o que se conhece como flutuabilidade positiva; caso seja o peso maior, tende a afundar ainda mais, flutuabilidade negativa; e, caso se igualem, o corpo tende a permanecer flutuando na cota em que estiver.

A filosofia de projeto de submarinos tem sido a de manter o navio com flutuabilidade neutra. Isso nem sempre foi assim. O primeiro submarino a apresentar a flutuabilidade neutra foi o Protector , projetado por Simon Lake e lançado em 1902 (GUERRA, 1964).

A escolha da flutuabilidade neutra decorre de dois fatores: as flutuabilidades positiva ou negativa obrigam a se gastar constantemente uma energia que mantenha o navio na cota desejada; a outra razão é que a flutuabilidade neutra é mais segura porque evita que o navio, por pane de energia, ou afunde (há relatos de colapso de submarinos nucleares por pane do reator) ou suba inesperadamente à superfície, onde fica vulnerável a ataques do inimigo.

Veículos não tripulados e de fins pacíficos como ROVs costumam ter flutuabilidade positiva, pois isso facilita sua recuperação em panes, há normas inclusive no sentido de se observar uma flutuabilidade positiva para os espaços habitáveis (*Underwater Vehicles, Systems and Hyperbaric Facilities*, 2002)

Todas as versões propostas adotam a flutuabilidade neutra.

O princípio de Arquimedes garante que a força empuxo seja igual ao volume de água deslocada pelo corpo. O casco resistente tem um peso, dado por toda matéria em seu interior, equipamentos e pessoal, e um volume, dado pelo volume de sua forma cilíndrica. Chamando-se a relação peso/volume do casco resistente de peso específico do casco resistente, $\gamma_{\text{resistente}}$, em analogia a peso específico da água, $\gamma_{\text{água}}$, vê-se que há três possibilidades para essa grandeza:

- (i) $\gamma_{\text{resistente}} < \gamma_{\text{água}}$;
- (ii) $\gamma_{\text{resistente}} = \gamma_{\text{água}}$;
- (iii) $\gamma_{\text{resistente}} > \gamma_{\text{água}}$.

No caso em que se verifica a primeira condição, $\gamma_{\text{resistente}} < \gamma_{\text{água}}$, quando submergir, o navio deve ter lastro no interior do volume resistente para garantir a flutuabilidade neutra.

Na segunda condição, $\gamma_{\text{resistente}} = \gamma_{\text{água}}$, todos os volumes externos terão de ser neutros também.

Na terceira condição, $\gamma_{\text{resistente}} > \gamma_{\text{água}}$, quando submergir o navio deve haver externamente ao casco resistente volumes que garantam que o submarino como um todo tenha flutuabilidade neutra.

É desejável que o casco resistente tenha pequena diferença de densidade com relação à água, ou seja, que a relação $\gamma_{\text{resistente}}/\gamma_{\text{água}}$ seja aproximadamente 1 de forma a permitir o controle das variações de densidades devido às variações de consumo e temperatura. Essa é a hipótese adotada pelo híbrido, ou seja, $\gamma_{\text{resistente}}/\gamma_{\text{água}} \sim 1$.

5.5.3.2 VERSÃO DUPLO CASCO: DETERMINAÇÃO DO DIÂMETRO E COMPRIMENTO DO CASCO RESISTENTE (V1,V2,V3)

A área que serve para se movimentar a bordo e permite a instalação de equipamentos é entendida como a área útil de convés, ou seja, toda área de convés plana, com pé direito maior ou igual que 1 m (BURCHER e RYDILL, 1994).

O aumento no diâmetro do casco resistente (D) faz crescer a área útil dos conveses dos submarinos linearmente, enquanto provoca o aumento no volume (V_{cr}) de forma quadrática. O aumento do comprimento (L_{cr}), por outro lado, implica aumentos lineares no volume e na área útil.

Tanto o aumento no comprimento (L_{cr}), quanto no diâmetro (D) encarecem o custo das embarcações, portanto devem ser minimizados.

Nesse trabalho, para se descobrir as dimensões L_{cr} e D, parte-se de um diâmetro mínimo de 2 m, de forma a permitir o trânsito de pé no interior do casco resistente e busca-se encontrar um ponto de mínimo em que o aumento diâmetro do casco resistente (necessário por razões de habitabilidade) resulte em uma perda de área útil menor que a perda em comprimento. Deve-se lembrar que se quer diminuir comprimento, mas não se quer perder área útil.

Medindo-se a perda percentual em comprimento pelo parâmetro $\Lambda(D)$ e a perda percentual em área pelo parâmetro $\Sigma(D)$, o diâmetro D, procurado, que representa a maior área útil pelo comprimento é dado pela menor razão $\Sigma(D)/\Lambda(D)$.

$$\Sigma(D_2) = (\text{Área}_{D2} - \text{Área}_{D1}) / \text{Área}_{D1} \quad (7)$$

$$\Lambda(D_2) = (\text{comprimento}_{D2} - \text{comprimento}_{D1}) / \text{comprimento}_{D1} \quad (8)$$

Tabela 18 - Determinação do diâmetro do casco resistente

V_{cr} [m ³]	D [m]	Área($\pi D^2/4$) [m ²]	L_{cr} [m]	Área Útil ($D \cdot L_{cr}$) [m ³]	Σ/Λ []
243	2	3.1416	77.3491	154.69824	
243	2.5	4.9087	49.5034	123.75859	55.56%
243	3	7.0686	34.3774	103.13216	54.55%
243	3.12	7.6453	31.7838	99.16554	50.98%
243	3.5	9.6211	25.2569	88.39899	52.87%
243	4	12.5664	19.3373	77.34912	53.33%

Na Tabela 18, a menor razão $\Sigma(D)/\Lambda(D)$ é de 51% ($D = 3.12$ m). Note-se que para simplificar os cálculos, considerou-se que todo o volume é resistente à pressão.

Burcher e Rydill (1994) afirmam que o número de conveses cresce de forma discreta com o diâmetro: para cada convés inserido no interior do casco resistente, deve-se ter a razão diâmetro/número de conveses ligeiramente maior que a altura média dos homens.

De acordo com os mesmos autores, para o híbrido, assumindo-se a altura de um homem menor que 2 m, tem-se diâmetro/altura = $3.12/2 = 1.57$ conveses, indicando talvez a necessidade de crescer o diâmetro para 4 m de forma a se ter dois conveses.

Tomando-se agora o caso concreto do híbrido e utilizando-se das relações anteriores, tem-se (Tabela 19):

Tabela 19- Conseqüências do aumento do diâmetro para 4 m.

V_{cr}	D	$4V_{cr}/(\pi \cdot D^2)$	W (t)	Área	2 conveses
243	3.12	32	36	99	
243	4	19	36	77	154

Onde W é o peso estrutural e D, o diâmetro, A, a área do convés, simplifiadamente ($L_{cr} D$).

Como o peso estrutural permanece o mesmo, parece interessante, de fato, aumentar o diâmetro de 3.12 m para 4 m, pois se poderia dobrar o número de conveses fazendo a área saltar de 77 m² para 154 m².

No projeto do navio patrulha com características submersíveis, entretanto, deve-se levar em conta outras considerações.

O aumento do diâmetro significa uma diminuição de comprimento (queda de 31 m com 3.12 m para 19 m, com 4 m) e isso representa uma maior resistência ao avanço na superfície.

Como se pretende otimizar as características hidrodinâmicas do híbrido na superfície, utilizou-se do método de Savitsky (1964) de forma a se obter uma informação acerca da influência do comprimento na resistência ao avanço e conseqüentemente na potência requerida (variando parâmetros em torno das dimensões do híbrido).

A escolha de Savitsky (1964) dá-se em virtude de seu método representar o comportamento de embarcações sustentadas por pressão dinâmica, e qualitativamente servir para explicar o comportamento de embarcações de semiplaneio.

Utilizando-se de um estudo de sensibilidade da variação da potência em função do aumento do comprimento pode-se obter um gráfico como o apresentado na Figura 68. Para tanto, fixando-se o deslocamento em 243 m³ (249t), variam-se os parâmetros nas seguintes faixas: 22 m < L < 32 m; 1.55 m < T < 2.63 m; 11 m < LCG < 14.5 m; 2.1 m < VCG < 2.4 m; 7.8 m < B < 10.8 m; 16° < β < 32°; 1.3 m < fp < 3.2 m; 0.76 < Fn < 0.88. Obtém-se, então, a regressão (com R²= 0.95):

$$EkW = (-836.41\text{comprimento} + 31146)/2 \quad (9)$$

Fica mais fácil visualizar esse efeito pelo gráfico a seguir, em que se evidencia a diminuição da resistência ao avanço na superfície com o aumento do comprimento:

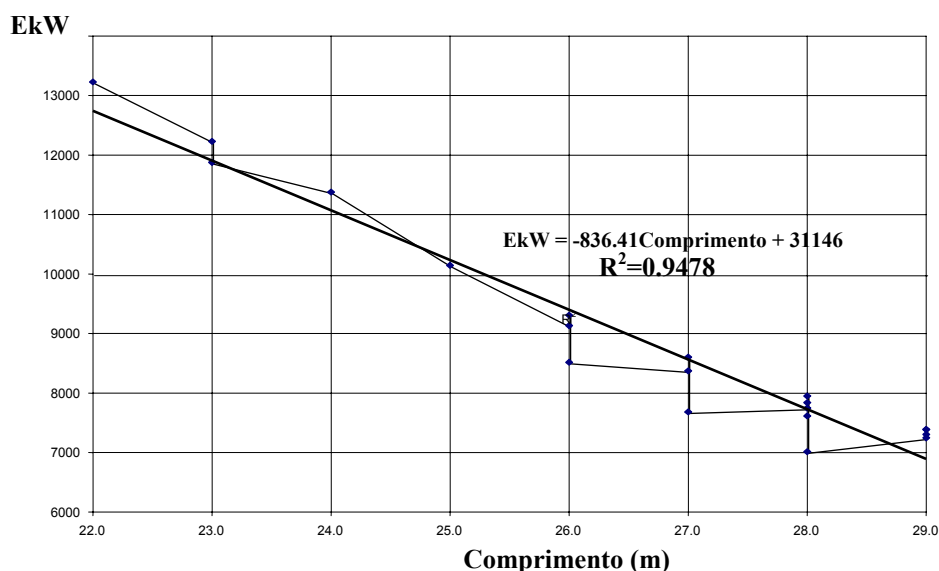


Figura 68 – Sensibilidade da Potência ao aumento do comprimento

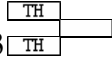
Com o aumento do diâmetro a potência requerida aumenta em 50%, enquanto que a área cresce 30%, na conversão de 1 convés em 2 conveses, o que força optar-se

pelo menor diâmetro, não em razão do volume submerso, mas da potência requerida na superfície.

Apesar de determinado o diâmetro do casco resistente, esse pode ser diferente nas seções ao longo do comprimento dos submarinos, sendo essa a regra geral. Em ciclos posteriores o diâmetro calculado pode variar, por ora, permanece fixo.

O comprimento, ora determinado, porém é apenas um valor inicial. De fato, é determinado em função do arranjo.

5.5.3.3 VERSÕES V4, V5, V5A e V6

As versões monocasco (V4 , V5 , V5A ) e a versão V6 , têm seu volume resistente à pressão muito semelhante numericamente às versões duplo casco (V1 , V2 , V3 ) , mas seu valor fica determinado após o arranjo geral.

Existe uma tendência no navio de ocupar os espaços sempre no sentido longitudinal o que resulta naturalmente em uma razão L/B sempre muito maior que 1. Encontra-se muita dificuldade em razão disso de se obter um aproveitamento das grandes bocas úteis à resistência ao avanço de cascos planadores, isso é um fator de vantagem para as versões semiplaneio, V5  e V5A .

5.6 TRIPULAÇÃO E NAVEGAÇÃO

A tripulação deve ser minimizada, pois ela é determinante de muitos dos grupos de peso variável, ou seja, a tripulação determina víveres, aguada, oxigênio, etc.

O trabalho de Freire (2002) explica que já é possível a utilização de plataformas não tripuladas para tráfego de mercadorias nos oceanos. Isso permite que se diga com tranquilidade que o híbrido pode possuir um computador de bordo capaz de navegar, restando à tripulação as tarefas de combater e selecionar seus alvos.

Atualmente os radares permitem o acompanhamento de vários alvos podendo até reconhecer o grau da ameaça e seu grau de importância através de *softwares* dedicados. A possibilidade de construção de *softwares* que decidam ações de combate a serem efetuadas aponta para uma exequibilidade a baixos custos.

Parece mais simples e seguro, no atual grau de desenvolvimento, carregar-se um homem que possa escolher quais os alvos são ameaças e que ações tomar em tempo de guerra. Esse homem tomaria as ações do interior da embarcação, de onde receberia informações de seu console unificado. Com isso a tripulação do navio passaria a ser de um homem.

A carga de trabalho humana é mundialmente reconhecida em torno de 8h diárias, poucos são os países que a excedem e poucos admitem turnos menores.

Nesse sentido, são necessários 3 turnos de 8h para garantir o navio num período de 24h. São necessários no mínimo, portanto, três vezes a tripulação necessária para o guarnecimento de todos os equipamentos, logo três homens.

A melhor opção para a tripulação mínima seria o número de 6 tripulantes, o que permite redundância de dois em cada turno (quarto) de serviço de oito horas permitindo que ambos os tripulantes mutuamente se apoiem e, com isso, diminuam a probabilidade de falhas.

A filosofia do projeto é, portanto, que o navio tenha sozinho a capacidade de combate e operação, sendo sua tripulação mera passageira, ou verificadora dos sistemas automatizados de bordo, ficando isso possível pelo alto grau de automatização e do pequeno custo de *hardwares* atuais.

A navegação do híbrido se processa por meio eletrônico no interior do navio, via consoles o que implica a vela ser desguarnecida, a menos da atracação. Merece menção o trabalho de Freire (2002), navio não tripulado.

5.7 ANÁLISE DA FORMA DA PROA E DA POPA

O problema se divide em forma da proa para as versões com casco do tipo SWATH e para as versões planeio e semiplaneio.

5.7.1 ANÁLISE DA PROA DAS VERSÕES SEMIPLANEIO E PLANEIO (V1



Proa e popa dos modernos submarinos são dadas por equações da forma (JACKSON, 1992):

$$y_f = \frac{D}{2} \left[1 - \left(\frac{x_f}{L_f} \right)^{n_f} \right]^{1/n_f} \quad y_a = \frac{D}{2} \left[1 - \left(\frac{x_a}{L_a} \right)^{n_f} \right] \quad (10)$$

onde y_f é a meia boca, x_f é a abscissa de proa e L o comprimento do corpo de proa; onde y_a é a meia boca de popa, x_a é a abscissa de popa e L_a o comprimento do corpo de popa e n_f é um número inteiro.

Essas equações representam sólidos de revolução com eixo em x (de quem são caso particular os elipsóides, na proa, quando $n_f=2$). Jackson (1992) explica que as formas carenadas, como as da série 58 de Gertler (1950) de corpos de revolução, acabam diferindo minimamente dessas equações de forma que ambas são muito representativas de quase todas as formas de submarinos.

Os navios de superfície dependem da restauração hidrostática, ou seja, da linha d'água de proa para restaurar a posição de equilíbrio do navio em ondas. Como consequência disso para a proa, as obras mortas das embarcações têm um alargamento expressivo no plano transversal enquanto nas obras vivas apresentam-se formas afiladas como facas, *wave piercing*.

A navegação dos antigos submarinos na superfície demonstrou a vantagem de se ter uma vela elevada de forma a proteger os homens que estão no passadiço do embarque de água na proa, que, nesse caso, varre praticamente todo o comprimento do navio.

A maior parte dos submarinos até a década de 70 do século XX tinham uma proa assimétrica quando em perfil, assim como a de praticamente todos os navios de superfície. Apesar desse formato obter um desempenho sofrível quando submerso, essa forma possibilitava uma melhor navegação na superfície, pois garantia a necessária recuperação hidrostática. Guerra (1964) ao referir-se aos submarinos de esquadra (*fleet*

submarines) afirma que tinham um desempenho melhor em ondas que os navios de superfície de mesmo porte, pois tinham um peso estrutural maior. O tipo XXI alemão era dotado de uma proa wave-piercing e simétrica com relação ao plano da água.

O híbrido não pode ser bojudo, pois nesse caso não atingiria boas velocidades na superfície, pois os cascos de semiplaneio e planeio exigem proas afiladas.

Há, portanto, duas possibilidades para a proa afilada do híbrido: assimétrica ou simétrica.

Se assimétrica, assemelhar-se-ia aos antigos submarinos diferindo daqueles navios em virtude de seu pontal, que no híbrido é praticamente igual ao de um navio de superfície, o que dificulta o fenômeno de embarque de água. Além disso, a navegação do híbrido se processa por meio eletrônico, ou seja, a vela é desguarnecida, donde ser dispensável uma grande recuperação hidrostática, mas ao contrário, ser interessante que essa recuperação seja lenta de forma a melhorar o comportamento no mar.

Se simétrica, o fenômeno de embarque de água seria mais significativo, mas não representaria obstáculo à operação (notadamente, a navegação). Haveria recuperação hidrostática, mas essa recuperação seria mais lenta, o comportamento no mar, mais suave, e o navio cortaria as ondas ao invés de sobrepassá-las. Quando submerso, o desempenho do casco simétrico é superior em matéria de ruído e manobra.

A adoção do formato *wave piercing* deve ser descartada, porque melhora o comportamento em ondas em detrimento do aumento em resistência ao avanço, o que contribui para queda na velocidade, parâmetro que se quer maximizar.

A solução deve convergir para simetria (seguindo o exemplo do Tipo XXI). Entretanto, adota-se para a versão V5  (como definida no item 4.1.8) a forma simétrica e para as demais a forma assimétrica. Isso se dá em razão de que o casco cilíndrico obriga o navio a ter um pontal mais alto, com isso, o peso da parte não-resistente é maior, obrigando a adotar-se a assimetria de forma a impedir o empilhamento de água. (As formas de planeio e semiplaneio funcionam em virtude de costado quase reto e uma linha de proa que se prolonga através das obras mortas).

5.7.2 ANÁLISE DA FORMA DA POPA DAS VERSÕES SEMIPLANEIO E PLANEIO

Novamente, para a versão V5 , a popa do híbrido é simétrica em dois planos longitudinais: horizontal e vertical. No caso de casco duplo, a popa é assimétrica de forma a minimizar a área molhada e, conseqüentemente, o peso.

5.7.3 ANÁLISE DA PROA E DA POPA DA VERSÃO SWATH E V6

A versão SWATH  e V6  têm uma proa bojuda semi-elíptica por facilidade construtiva e por aproveitar o casco de pressão, que, na proa, possui o mesmo formato, semi-elíptico, dispensando o casco hidrodinâmico.

A Figura 69 apresenta a proa e a popa dos torpedos do SWATH  e da versão V6 , nela, L é o comprimento do casco resistente e D o diâmetro.

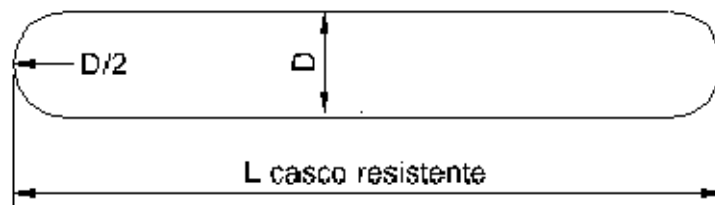


Figura 69 – Corpo cilíndrico do SWATH e da versão V6

5.8 ESTIMATIVA DE POTÊNCIA INSTALADA POR SEMELHANTES

Tendo-se em conta que navios militares têm dimensões que maximizam sua velocidade, características manobráveis e combativas, pode-se afirmar que o estudo de semelhantes conduz ao conhecimento dos limites físicos alcançáveis pelo intercâmbio (*trade off*) entre os parâmetros raio de ação, velocidade e armamento, como bem observado em Rudko (2003).

Nesse sentido, mesmo que informações como tipo de casco ou mesmo armamento e tipo de propulsão não estejam disponíveis, o estudo de semelhantes conduz a valores médios capazes de prever o comportamento futuro da embarcação a ser projetada.

Assim pode-se obter uma potência e velocidades necessárias à embarcação antes mesmo de se conhecer suas linhas, pois a funcionalidade obriga a embarcação a ter esse ou aquele tipo de casco, esse ou aquele tipo de propulsão que variará em função do limite físico que se pretende atingir com o navio. Apesar de o projeto apresentar muitas soluções, existem sempre algumas que são mais adequadas, e é a isso que se busca com esse estudo.

Efetua-se um estudo em separado para as versões de casco tipo SWATH, em virtude do grande distanciamento entre ele e as demais embarcações de sustentação dinâmica.

5.8.1 REGRESSÃO PARA A POTÊNCIA INSTALADA NAS VERSÕES V1 A V5A

Utilizando-se uma série de navios semelhantes em funcionalidade e deslocamento, pode-se ter uma idéia da potência de uma nova embarcação. Isso sempre incorpora um erro que é tanto menor quanto mais semelhantes os navios.

A utilidade do procedimento de cálculo preliminar de potência via semelhantes é se saber de antemão os limites de velocidade que uma embarcação poderá atingir, ou melhor, qual a faixa de valores em que a embarcação terá *a priori*. Isso decorre de que o projeto de qualquer navio tem suas formas otimizadas em torno de um ponto n-dimensional de *fatores de projeto* e a atração de um novo projeto em direção à reta determinada pelos anteriores é sempre muito grande, a não ser quando há mudanças tecnológicas significativas, que, em economia, costumam-se chamar “quebras de

paradigma” (por exemplo, como da mudança de navios à vela para navios a vapor). De resto, sempre é muito difícil vencer os limites físicos.

Para a estimativa de potência utilizam-se os navios da Tabela 20, que difere ligeiramente da Tabela 117, que serviu para o cálculo da função de mérito do híbrido:

Tabela 20 - Estimativa de Potência

CLASSE	Δ	L	B	T	V	BkW	Fn	reg ₁	% ₁	reg ₂	% ₂
<i>P48S</i>	308	53	7	2	25	4311.88	0.57	5281	22	5130	19%
<i>Npa Grauna</i>	260	47	8	2	22	4326.8	0.53	3766	-13	3371	-22%
<i>Flyvefisker</i>	300	54	9	3	30	4476	0.67	6301	41	6941	55%
<i>Fremantle</i>	211	48	7	2	31	4565.52	0.73	5363	17	6190	36%
<i>SG-40</i>	210	41	7	2	30	4998.2	0.77	6044	21	5795	16%
<i>Sattahip</i>	300	50	7	2	22	5087.72	0.51	4021	-21	3881	-24%
<i>Lagaza</i>	275	58	8	3	28	5595	0.60	4758	-15	5857	5%
<i>Rauma</i>	248	48	8	2	30	5602.46	0.71	5567	-1	6279	12%
<i>Spica</i>	240	44	7	2	35	6848.28	0.87	8485	24	8089	18%
<i>Helsinki</i>	280	45	9	3	30	7631.58	0.73	7390	-3	6686	-12%
<i>Gerong</i>	244	45	7	3	32	8392.5	0.78	7402	-12	6993	-17%
<i>Ratcharit</i>	235	50	8	2	37	8593.92	0.86	8038	-6	8791	2%
<i>Combatante II</i>	275	47	7	3	36	8952	0.86	9279	4	8918	0%
<i>Tiger</i>	265	47	7	3	36	8952	0.86	9161	2	8790	-2%
<i>Lungching</i>	250	50	7	2	40	8952	0.93	9474	6	10129	13%
<i>Saar-II</i>	250	45	7	3	40	8952	0.98	10399	16	10129	13%
<i>OSA-1</i>	210	39	8	2	35	8952	0.92	7913	-12	7707	-14%
<i>Kaman</i>	275	47	7	2	38	9160.88	0.91	9671	6	9683	6%
<i>Willemois</i>	260	46	7	3	38	9511.5	0.92	9695	2	9492	0%
<i>Lurssen-45</i>	228	45	7	3	40	9563.72	0.98	9867	3	9849	3%
<i>Prabparapak</i>	224	45	7	2	40	10175.44	0.97	9494	-7	9798	-4%
<i>Perdama</i>	265	47	7	2	37	10444	0.89	9088	-13	9173	-12%
<i>Asheville</i>	245	50	7	3	40	10817	0.93	9687	-10	10066	-7%
<i>Tuima</i>	245	34	8	3	37	11190	1.05	10806	-3	8918	-20%
<i>Ramadan</i>	307	52	8	2	40	11458.56	0.91	10562	-8	10855	-5%

Na Tabela 20, a coluna Δ indica o deslocamento em toneladas; L, comprimento em metros; B, boca em metros; T, calado; V velocidade máxima em nós; BkW, Potência instalada em kW; reg₁ indica os valores obtidos para os pontos (deslocamento, comprimento, boca, calado, velocidade máxima) na reta n-dimensional que dá a potência estimada, %₁ indica a distância percentual entre reg e os valores iniciais; reg₂ os valores para regressão apenas em função de Δ , L e V, e analogamente %₂.

A reta n-dimensional gerada para a potência por semelhantes, da coluna reg₁ é:

$$\text{BkW} = 357.86V + 538.52T - 234.80B - 143.64L + 24.86\Delta - 3368 \quad (11)$$

E para reg₂:

$$\text{BkW} = -151.71L + 371.67V + 26.92\Delta - 4481.50 \quad (12)$$

5.8.2 REGRESSÃO PARA POTÊNCIA INSTALADA DAS VERSÕES SWATH E V6

Não há razões para distinguir a estimativa preliminar de potência para a versão SWATH daquela para a versão V6, porque ambos têm como semelhantes os mesmos navios-base. Assim, para ambas, o estudo de semelhantes resultou na seguinte regressão, com os dados utilizados listados na Tabela 21:

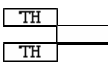
$$\text{BkW} = (0.1043\Delta^{1/3} - 0.3086) 0.746v^3 \quad (13)$$

Tabela 21 - Navios semelhantes ao SWATH, L comprimento, B boca, T calado, V velocidade, Δ: deslocamento na superfície e BkW potência instalada do SWATH

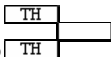
NAVIO	PAÍS	L (m)	B (m)	T (m)	Δ (t)	V (nós)	BkW
S3 Research	EUA	66.5	29	5.88	2529	16.5	3750
Marine Ace	Japão	12	6	1.5	30	18	298
Navatek	EUA	43	16	2.44	365	18	2014
Alción	EUA	18	9	2.3	57	20	761
Kotozaki	Japão	27	12	4.6	236	20.5	2835
Ohtori	JAPÃO	27	12.5	3.4	251.5	20.6	2835
27.1 Metre	Coréia	27.1	12.4	3.6	132	24.7	2656
SSP Kaimalino	EUA	27	14	9.7	217	25	3282
Seagull	Japão	36	17	3.2	338	27	6043
Ocean 430	EUA	35.4	13.7	2.9	167.6	30	2835
FDC-400	Inglaterra	36.5	13	2.7	180	31.7	2894

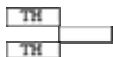
5.8.3 POTÊNCIA PRELIMINAR REQUERIDA PARA AS VERSÕES SWATH /V6 E AS VERSÕES DE SUSTENTAÇÃO DINÂMICA (V1 A V5A)

O intuito desse ponto é descobrir qual o valor aproximado de potência instalada (BkW) a ser carregada para o arranjo preliminar.

Nada se tem de preciso, por enquanto, mas se estima que o deslocamento seja de 250 t (para todas as versões com casco resistente cilíndrico) e o comprimento resistente deve variar em torno de 35 m (pois deve ser maior que o comprimento do casco resistente), seja continuamente, ou dividido em mais de um casco (como no caso das versões V3  e SWATH .

As regressões de potência permitem, secundariamente, comparar os valores obtidos por regressão para as versões SWATH /V6  e, paralelamente, para V1

, V2 , V3  V2A  V4 , V5 , V5A , e isso é um exercício aqui praticado, tanto na Tabela 22, como na Tabela 23, respectivamente, com os valores de dimensões dessa fase e com os valores finais das versões V2A , a mais detalhadamente estudada.

Nesse ponto não se conhece a forma hidrodinâmica das versões V1 , V2  e V3  que oscila entre o planeio e o semiplaneio. Tal oscilação não é captada pela regressão, mas, como se disse, os projetistas evitam utilizar formas que sejam ineficientes, substituindo planeio e semiplaneio quando necessário.

Na Tabela 22, apresenta-se um estudo de sensibilidade em que se faz variar o comprimento molhado da versão V1 , V2  e V3  em 30, 35 e 40 m, utilizando-se apenas os valores de potência obtidos por regressão do item 5.8.1.

Tabela 22 - Potência requerida comparada entre as versões SWATH/V6 e a versão V2A

V	Δ	SWATH	V1/V2/V3		
(m/s)	(t)	(BkW)	L=30	L=35	L=40
17	250	1277	4016	3257	2499
19	250	1783	4759	4001	3242
20	250	2080	5131	4372	3614
21	250	2407	5503	4744	3985
22	250	2768	5874	5116	4357
23	250	3163	6246	5487	4729
24	250	3593	6618	5859	5100
25	250	4062	6989	6231	5472

Percebe-se, na Tabela 22, a vantagem dos valores entre 35 e 40 m para o casco hidrodinâmico e uma vantagem das versões SWATH /V6  com o aumento da velocidade. Descobre-se mais tarde que as versões SWATH /V6 , porém, necessitam de um volume para a propulsão, que não existe a bordo, a partir de 19 nós, SWATH  e 22 nós, V6 .

A Tabela 23 apresenta a estimativa de potência por semelhantes, através da regressão representada por (11) serve de aferição do projeto, pois compara o navio em estudo com os demais navios no resto do mundo. Apresenta-se como um método razoável, pois para a velocidade de 22 nós, indica a potência instalada é de 5125kW,

muito próxima do valor final 5200 kW na versão final do semiplaneio com hidrojoato (casco duplo) , chamada V2A .

Tabela 23 - Tabela obtida com o uso da regressão (13)

V (m/s)	T (m)	B (m)	L (m)	Δ (t)	V2A (BkW)	SWATH (BkW)
17	2	6.9	36.9	260	3335	1277
18	2	6.9	36.9	260	3693	1516
19	2	6.9	36.9	260	4051	1783
20	2	6.9	36.9	260	4409	2080
22	2	6.9	36.9	260	5125	2768
23	2	6.9	36.9	260	5482	3163
24	2	6.9	36.9	260	5840	3593
25	2	6.9	36.9	260	6198	4062

5.9 EQUIPAMENTOS NO INTERIOR DO CASCO RESISTENTE

O arranjo do casco resistente cilíndrico ou do volume resistente à pressão (no caso das versões duplocasco³) deve conter necessariamente:

- (i) Baterias para propulsão submersa;
- (ii) Motores Diesel-Geradores;
- (iii) Motores elétricos de propulsão;
- (iv) Engrenagens redutoras e mancais de escora;
- (v) Todos os consoles da propulsão, armamento e comunicações;
- (vi) Todos os habitáveis;
- (vii) Espaços para as máquinas auxiliares, notadamente, compressores de ar e bombas;
- (viii) Todos os quadros elétricos e paióis de bordo.

A cada aumento no casco resistente aumenta-se o peso da embarcação e modifica-se o grupo SWBS a que pertence.

Com a estimativa preliminar de potência do item 5.8.3, entretanto, já se é capaz de dizer que a potência instalada necessária é superior a 5000 kW (versões planeio e semiplaneio, V1 , V2 , V2A , V3 , V4 , V5  e V5A , donde se pode pensar em um arranjo preliminar de máquinas que maximize a potência instalada nessa faixa e ao mesmo tempo minimize o peso, ou seja, minimize a razão peso/potência.

5.9.1 BATERIAS

As baterias de submarinos, diferentemente daquelas usadas em automóveis, são formadas de elementos de baterias avulsos que são ligados convenientemente.

O número de elementos de bateria depende da padronização adotada pelo país. Os equipamentos de bordo, por outro lado, operam em tensões múltiplas de 120V, ou de 110V no caso de alguns submarinos ingleses. Os submarinos alemães e ingleses de projeto mais recente, com exceções, adotam múltiplos de 120 elementos.

³ Duplocasco são os submarinos que possuem um casco resistente à pressão e uma envoltória hidrodinâmica considerável em torno desse casco resistente, como por exemplo os submarinos do tipo Laurenti (TURRINI e MIOZZI, 1999) ou do tipo Laubeuf (LAUBEUF, 1918).

5.9.1.1 ELEMENTOS

Adota-se, nesse trabalho, as baterias chumbo-ácidas. Os elementos de bateria de maior densidade de energia com informações disponíveis no mercado são os elementos tipo 16 UR 14 (Baterias para Propulsão de Submarinos, 2000).

5.9.1.2 CRITÉRIO DE DIMENSIONAMENTO DAS BATERIAS PARA AS VERSÕES EM ESTUDO

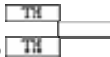
Segundo Turrini e Miozzi (1999) pode-se perfeitamente miniaturizar o navio, como se fez no início do século XX. É razoável, portanto, apesar de, no momento, não se encontrar nenhuma bateria suficientemente miniaturizada para o emprego dentro das necessidades do híbrido, que isso venha a ser possível, quando houver interesse em baterias para pequenos submarinos. Por ora, utilizou-se um elemento relativamente moderno e muito compacto.

Os elementos de baterias são excessivamente pesados e volumosos. Arranjo e baterias, portanto, foram dimensionados de forma iterativa, pesando-se o incremento do número de elementos, com o ganho de velocidade advindo dessa modificação, buscando-se sempre carregar o mínimo peso possível.

Para todas as versões, definido o elemento a ser carregado, passou-se a uma alocação inicial que depois do cálculo da velocidade submersa foi revista.

A alocação de elementos abaixo do valor inteiro necessário a compatibilização da ddp de bordo obriga o emprego de grandes inversores, que, de fato, aparecem nesse projeto, sendo muito volumosos e muito pesados.

5.10 ARRANJO PRELIMINAR

Esse arranjo apresenta a versão SWATH V1 , V3  e V2 , ainda sem o hidrojato, ou seja, como inicialmente idealizadas. As versões V5 , V4 , V5A  e V6  aparecem, posteriormente, na ordem em que foram calculadas, ou seja, após o projeto da versão V2A .

5.10.1 ANÁLISE DA INSTALAÇÃO PROPULSORA (V1,V2,V3)

Todo submersível apresenta a necessidade de carregar dois sistemas independentes de propulsão (GUERRA, 1964) e mutuamente exclusivos: um para a navegação submersa e outro para a navegação na superfície. Isso implica em peso desnecessário, indicando que quanto menor forem ambos, melhor para o submersível. Esse também é o caso do híbrido.

Primeiramente, desprezam-se quaisquer configurações independentes do ar, AIP. Isso se explica por três razões. A primeira razão, a principal, refere-se ao nível de informação sobre os AIP, até o momento, que não é suficiente para uma avaliação satisfatória.

A segunda razão explica-se porque as configurações AIP não se prestam a fornecer altas potências sem um elevado custo em peso.

A terceira e última razão refere-se ao fato de que a propulsão diesel elétrica satisfaz o problema.

A satisfação do problema propulsivo do híbrido com o emprego de propulsão diesel elétrica não quer dizer que esse tipo de propulsão seja melhor que o AIP, pois não é isso que se afirma.

Afirma-se, ao contrário, que seja necessário realizar-se um estudo posterior, principalmente no que se refere ao emprego de células de combustível, que têm sido empregadas até mesmo em navios comerciais.

Retiradas as opções AIP do estudo, passa-se a analisar possibilidades de combinações de motores diesel, motores elétricos ou turbinas. Essas combinações, entre outras, são julgadas as mais interessantes de forma a satisfazer o perfil de operação do navio que se estuda:

- (i) um único diesel gerador, um motor elétrico;
- (ii) um único turbogerador, um motor elétrico;

- (iii) dois turbogeradores, dois motores elétricos;
- (iv) uma instalação CODLOD (diesel elétrica para baixas potências e motor diesel com acoplamento direto em altas);
- (v) uma instalação CODLOG (diesel elétrica para baixas potências e turbina a gás com acoplamento direto em altas);
- (vi) conjuntos de diesel geradores e motores elétricos (versão V6);
- (vii) conjunto de motores elétricos e 1 diesel gerador (versão SWATH).

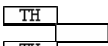
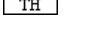
Considerando-se que a potência necessária seja superior a 5000 kW, não há um único motor diesel conhecido com essa potência que seja capaz de ser instalado no casco resistente cilíndrico de 3.12 m, mantendo os devidos espaços para manutenção.

Qualquer instalação diesel elétrica ou qualquer instalação composta de único *turbogerador e um único motor elétrico*, ainda que atenda à toda a faixa de potência necessária, é mais volumosa e muito mais pesada que qualquer combinação de um elemento de acoplamento direto (para altas velocidades) e outro elemento em velocidades menores. Além disso, a utilização em baixas potências acarreta a ociosidade de qualquer sistema de um único motor, tendo como consequências diretas, ora carbonização (diesel), ora baixo desempenho (turbina).

A instalação de dois turbogeradores e dois motores elétricos minimiza o problema de altura da instalação, mas não resolve o problema de peso de um motor elétrico grande, sempre subutilizado.

A instalação CODLOD continua inviável pelos espaços reduzidos para manutenção.

A turbina tem sempre menor altura que o motor diesel, e essa instalação ocupa menor volume no casco resistente. É também mais leve, apesar de carregar consigo uma engrenagem redutora que acresce em muitas vezes o seu peso. Isso pode ser minimizado com a utilização de um sistema hidrotrato. O item 5.10.1.2 apresenta essa e outras vantagens para a configuração com turbinas.

A opção CODLOG vence o processo decisório para as versões V1 , V2 , V3 , V2A , porque o navio tem uma necessidade intermitente de altas potências. Sua necessidade de altas potências ocorre na superfície, na velocidade de interceptação, momento em que entra a turbina (muito leve em comparação aos motores) e que, no mais, está desligada.

A diferença de consumo específico também é pequena entre as turbinas mais recentes e os motores diesel mais modernos, tem-se tipicamente a título de exemplo: 250 g/kW/h, para turbinas e 230 g/kW/h, para motores, o que não justifica em absoluto sua substituição.

Consideram-se a escolha das máquinas das versões V1 , V2 , V2A , V3  o arranjo da praça de máquinas das versões V1 , V2 , V2A , V3  muito eficientes, o que faz com que as versões V4 , V5  e V5A  aproveitem-se dessa escolha de máquinas e desse arranjo com algumas adequações.

As versões SWATH  e V6 , apresentam diesel geradores com motores elétricos, mas não apresentam turbinas. Esses tipos de combinações, com mecanismos adequados de controle de potência, evitam a carbonização dos diesel geradores. A versão V6 apresenta um grande número de pequenos motores que lhe permite grande flexibilidade, mas com severo ônus em perdas na eficiência do conjunto. Um grande motor elétrico utilizado a baixa potência, diferentemente de um motor diesel, tem sua vida útil aumentada, o que representa um ponto positivo da versão V6.

Os itens 5.10.1.2 e 5.10.1.3 apresentam uma série de características de peso e potência de turbinas e motores diesel maritimizados de forma a convalidar o que foi dito nos parágrafos precedentes.

5.10.1.1 MÁQUINAS ESCOLHIDAS (V1,V2,V3)

Para as versões V1 , V2 , V3  de catálogos comerciais, obteve-se um conjunto que apresenta a melhor relação entre dimensões (peso, comprimento, largura, altura) e potência. Esse conjunto compõe-se de Turbinas (Eurodyn de 2600 kW), GEP (GM6.5L VA NA-186kW) e MEP de 700kW. Na Figura 70, aparece essa configuração para a versão V2 , em fase intermediária de projeto. Nele, GOR, significa grupo de osmose reversa e GEP, gerador elétrico de potência.



Figura 70 - Arranjo final de máquinas no interior do casco resistente.

5.10.1.2 COMPARAÇÃO ENTRE O ARRANJO COM TURBINAS E O DIESEL COM ACOMPLAMENTO DIRETO (V1,V2,V3)

Procura-se acrescentar mais dados à discussão travada no item 5.10.1 sobre motores diesel e turbinas, para melhor elucidar a questão.

Os motores diesel apresentam volume e pesos muito grandes em comparação às turbinas, mas custo de instalação e consumo menores. A Figura 71, a seguir, apresenta valores de volume, peso e rotação obtidos de catálogos de motores e turbinas em função da potência fornecida por essas máquinas.

A rotação é importante, pois há sempre a exigência de adequação da rotação da turbina ou motor ao hélice ou hidrojato, conforme o caso. É comum reduzir-se a rotação dos motores ou turbinas de forma a evitar a cavitação, quanto maior essa redução, maiores o peso e volume de suas engrenagens redutoras.

A Figura 71, permite perceber que a turbina em cada comparação se encontra melhor posicionada com relação aos motores diesel:

- (i) O volume em litros da turbina (indicado por um círculo) está abaixo da linha dos motores diesel para a mesma potência;
- (ii) O peso em kg da turbina (indicado por um triângulo cheio), para a mesma potência, está abaixo da linha dos motores diesel;
- (iii) A rotação em rpm da turbina (indicado por um quadrado), para a mesma potência, está abaixo da linha dos motores diesel. Quanto menor a rotação menor a necessidade de redução, menor peso.

Essas informações parecem convalidar a escolha anteriormente efetuada no item 5.10.1.

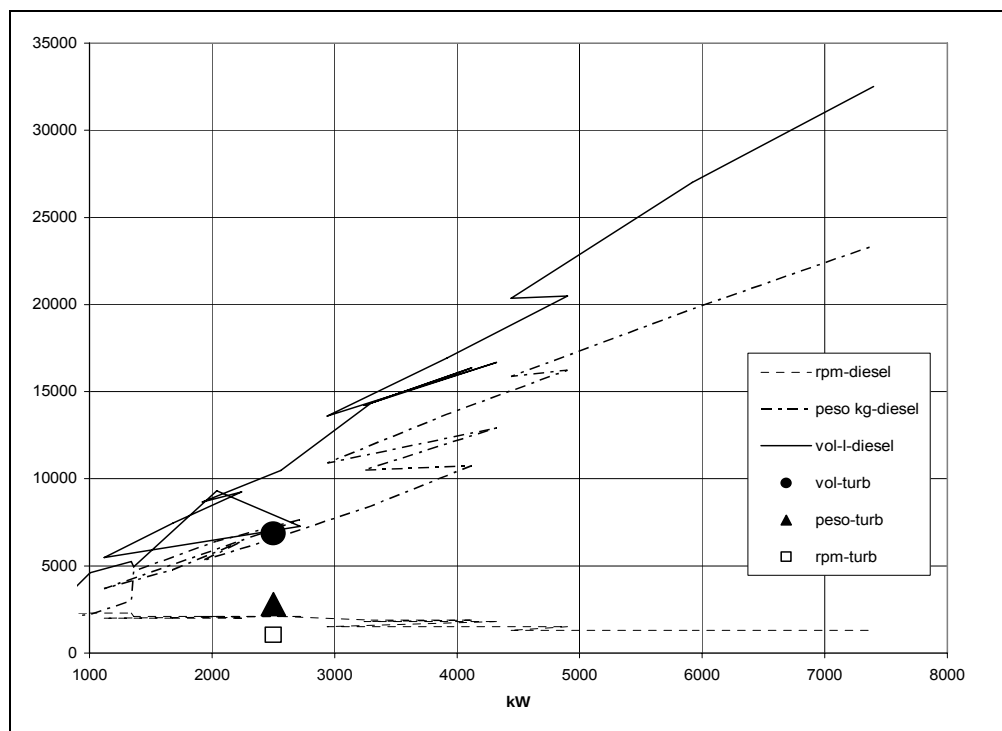


Figura 71 - Comparação entre a turbina escolhida e vários motores diesel. . O círculo negro é o volume em litros da turbina, o triângulo cheio seu peso em kg, e quadrado vazado sua rotação. As curvas rpm-diesel, peso-diesel e vol-l-diesel, representam valores de muitos motores diesel plotados no plano do gráfico.

5.10.1.3 COMPARAÇÃO ENTRE O ARRANJO COM TURBINAS E O DIESEL-ELÉTRICO (V1,V2,V3)

A fim de oferecer uma melhor compreensão do que foi dito a respeito da comparação entre turbinas e motores diesel no item 5.10.1.2, tomou-se uma série de motores diesel e comparou-se com a turbina escolhida. A potência possível de ser carregada no híbrido não atinge os 6000 kW. Com isso comparou-se uma instalação de 5000 kW diesel-elétrica com a instalação de duas turbinas, do modelo efetivamente escolhida. A Tabela 24 apresenta o peso e o volume da turbina em questão.

Tabela 24 –Modelo, peso e volume total da turbina

Turbina	Peso total [t]	Volume total [m ³]
2 x Eurodyn	5.6	13.7

Compare-se agora com uma série de conjuntos diesel geradores da MTU, oferecidos na Tabela 25:

Tabela 25 –Lista de conjunto diesel geradores

modelo	kW	Peso	n	L[m]	B[m]	H[m]	Pt	Vu[m ³]	Vt [m ³]
6R 099	93	0.62	54	1.22	0.76	1.00	33	1	50
6R 099	105	0.67	48	1.24	0.76	1.00	32	1	45
6R 183	275	1.18	18	1.69	0.89	1.22	21	2	33
8V 183	367	1.345	14	1.53	1.32	1.25	18	3	34
12V 183	550	1.65	9	1.85	1.32	1.26	15	3	28
8V 396	870	2.805	6	1.82	1.49	1.44	16	4	22
8V 396	925	3.35	5	2.33	1.54	1.53	18	5	30
12V 396	1310	3.89	4	2.34	1.54	1.56	15	6	21
12V 396	1390	4.46	4	2.87	1.54	1.69	16	7	27
16V396	1850	5.58	3	3.43	1.54	1.75	15	9	25
12V 595	2820	8.9	2	3.34	1.50	2.57	16	13	23
16V 595	3760	11.11	1	3.93	1.50	2.60	15	15	20

Onde modelo é o modelo do conjunto diesel gerador, kW é a potência contínua em kW a 60Hz, n é o número de conjuntos necessários para fornecer a potência de 5000 kW, L é o comprimento, B é a largura e H a altura do conjunto, Pt é o peso em t, Vu é o volume da unidade e Vt o volume de todas as unidades necessárias à potência.

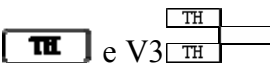
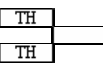
Como se pode ver a turbina é mais leve que qualquer combinação.

5.10.1.4 MOTOR ELÉTRICO PRINCIPAL (MEP) (V1,V2,V3)

Opta-se a pelo uso de motores elétricos de pólos permanentes. Dentre as vantagens do motor de pólos permanentes em relação aos motores elétricos de corrente contínua tradicionais, destacam-se:

- (i) são menores em tamanho e peso quando comparado ao motor C.C.;
- (ii) são mais eficientes;
- (iii) têm flexibilidade aumentada e operação do sistema simplificada.

5.10.2 ARRANJO PRELIMINAR INTERIOR DA VERSÃO V1, V2 E V3

Nesse momento, pode-se proceder a um arranjo preliminar em que já se podem inserir alguns outros equipamentos necessários. A Figura 72 e seguintes apresentam o arranjo das versões V1  e V3 , bem como a versão V2 , ainda sem o hidrojetato, ou seja, como inicialmente idealizada.

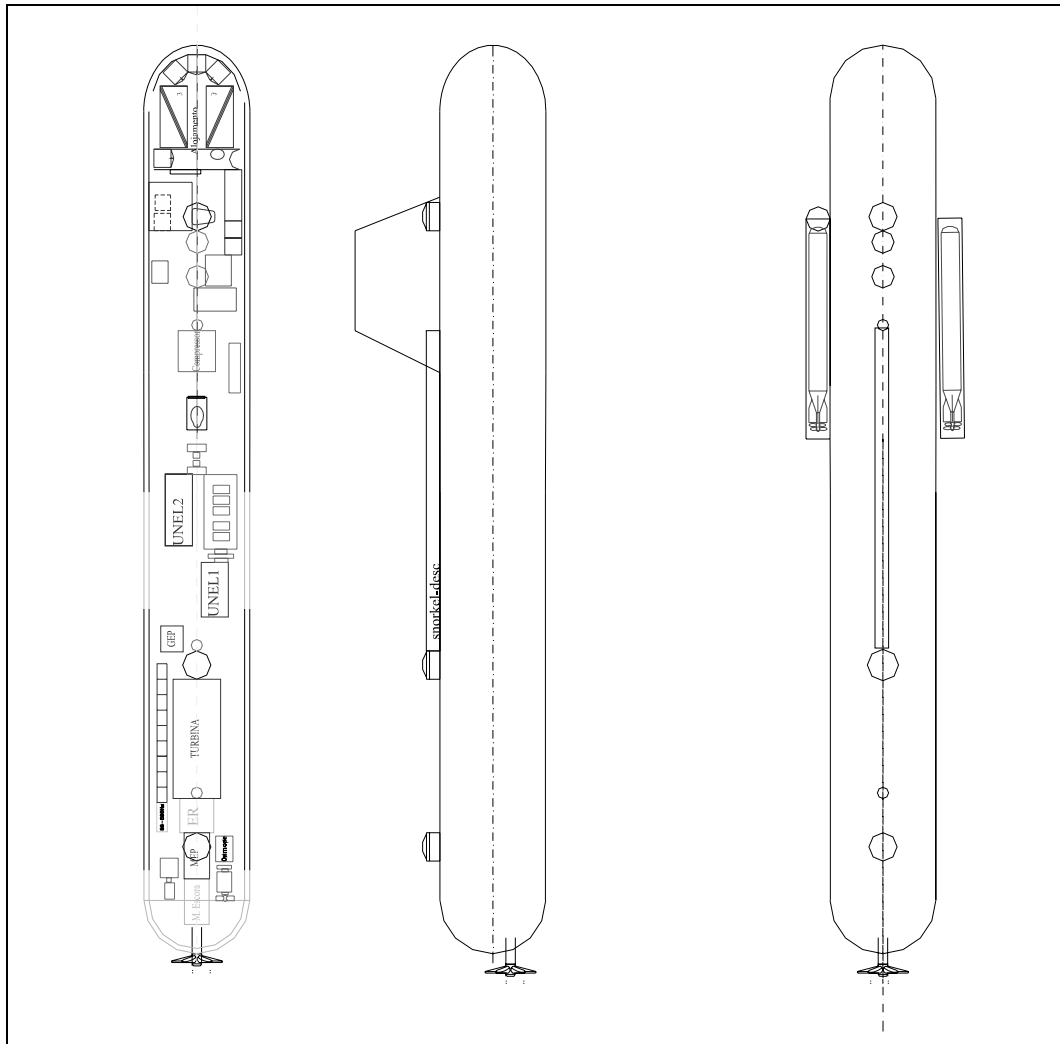


Figura 72 - Arranjo preliminar interno do casco resistente da versão V1

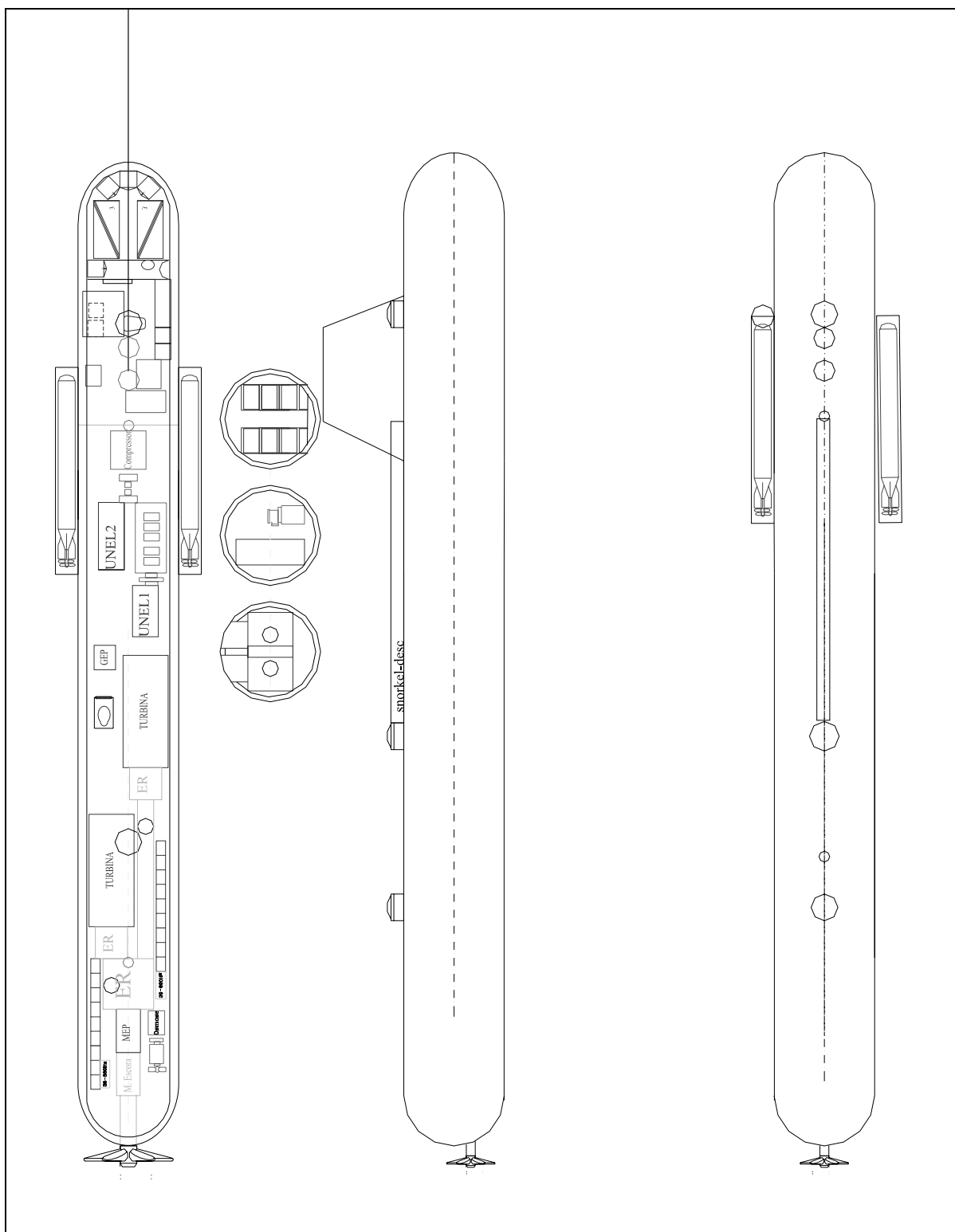


Figura 73 – Arranjo preliminar interno do casco resistente da versão V2

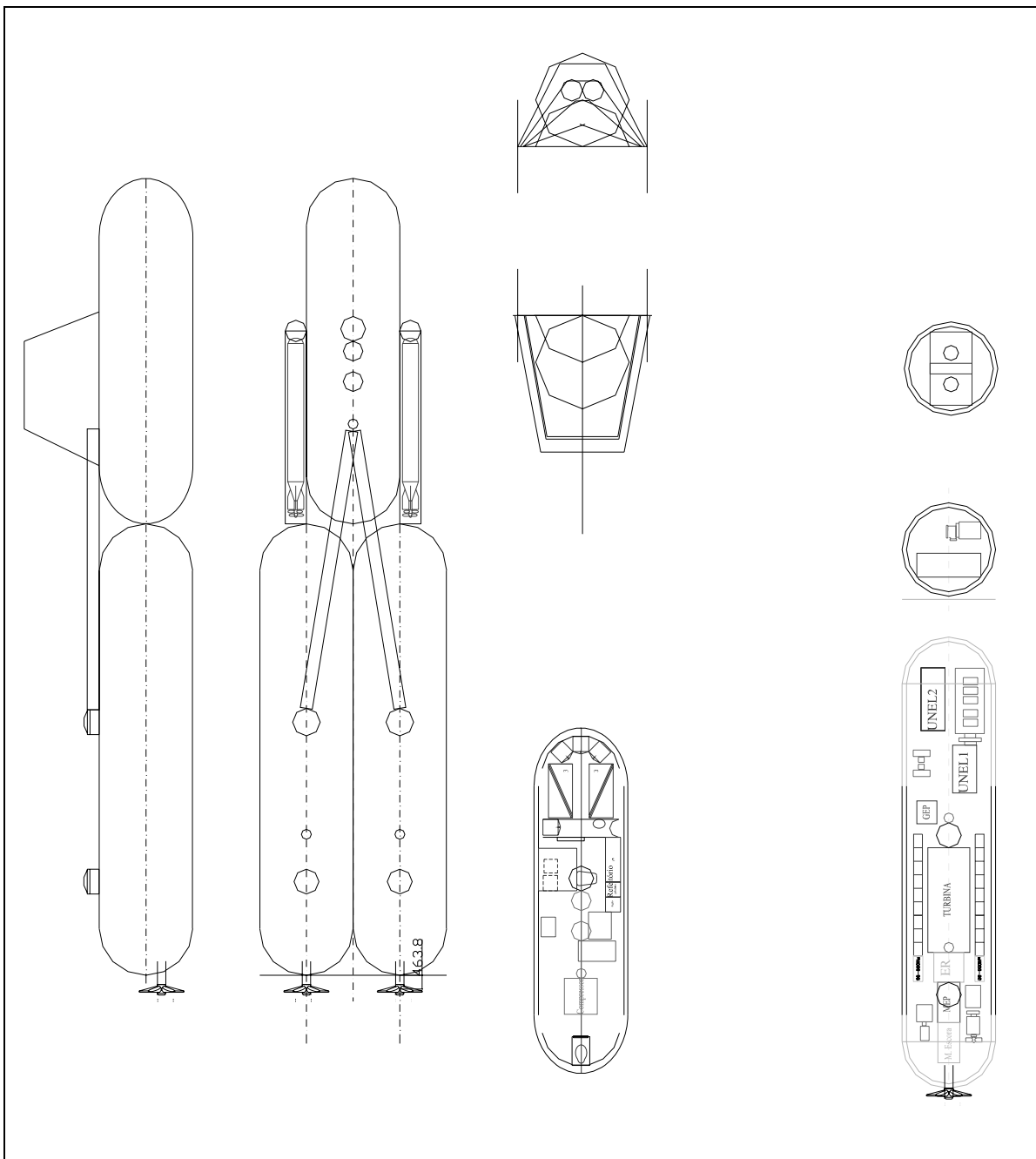


Figura 74 - Arranjo preliminar interno da versão V3

5.10.3 ARRANJO PRELIMINAR (SWATH)

Do arranjo preliminar, surgem as dimensões de L=11.6 m, B=11.6 m, D=9.2m. Optou-se para no SWATH pela propulsão diesel-elétrica, com um diesel-gerador, e dois motores elétricos. Não houve continuidade dessa versão, pois o peso estrutural inviabilizava sua flutuação. Nessa fase, porém, foi adotado da SIEMENS LTDA e ASEA BROWN BOVERI LTDA (ABB), o motor do tipo gaiola:

Tabela 26- Características do motor da versão SWATH

FABRICANTE	ABB - Máquinas Elétricas
Tipo	Gaiola (Indução)
Potência Nominal	2500 KW
Tensão Nominal	6000 V
Peso	10 t
Diâmetro	1180 mm
Comprimento	3050 mm
Largura	1880 mm
Altura (sem trocador de calor)	1190 mm

De catálogos, obtiveram-se os dados dos seguintes diesel geradores de 60Hz.

Tentou-se usar os três primeiros, optando-se, entretanto, pelo quinto, 16V4000:

Tabela 27 - Conjuntos diesel geradores . 1-MTU, 2-Cummins, 3 – Wärtsilä. Comp. é o comprimento do motor e Larg. sua largura

Gerador	Motor	Geração	Comp.	Larg.	Altura	Peso
		[kVA]	[mm]	[mm]	[mm]	[kg]
HPM12V4000G80 ¹	12V4000G80	1400	4600	1900	2390	11500
HPD50TAG3 ²	KTA50G3	1000	5740	1860	2374	10016
HPM12V2000G82 ¹	12V2000G82	630	4300	1500	1700	5600
?	16 V 396 SB	?	3000	1600	2800	6800
16V4000¹	Conjunto	1495	2879	1400	1735	7037
12VUD23 ³	Conjunto	1000	2300	1436	1550	3150

Adotou-se a seguinte configuração com 1 unidade do motor:

Tabela 28 –Configuração Adotada

Gerador	Motor	Geração	Comp.	Larg.	Altura	Peso
16V4000	Conjunto	1495	2879	1400	1735	7037

Novamente, com a máquina escolhida, pode-se proceder a um esboço do arranjo da embarcação, onde se vêem claramente os compartimentos habitáveis, de serviço e de máquinas.

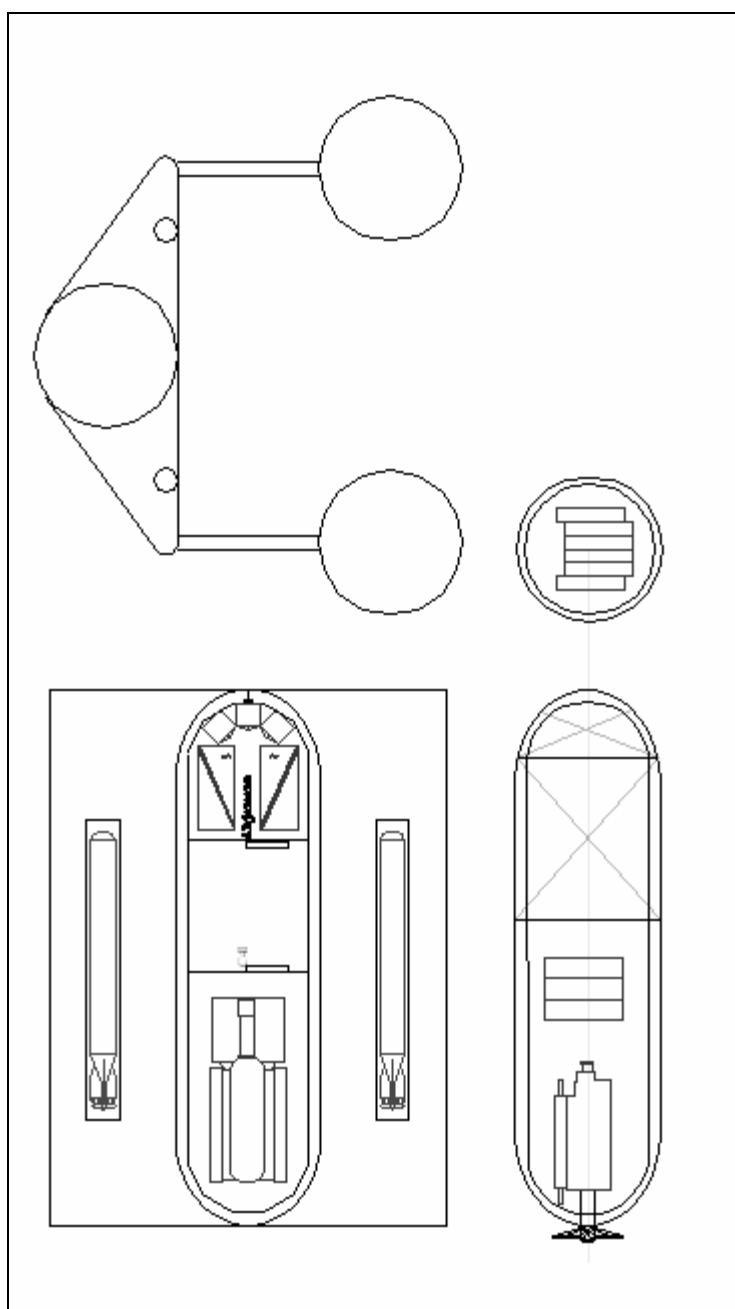


Figura 75 - Arranjo Preliminar interno da versão SWATH

5.11 COMPRIMENTO DO CASCO RESISTENTE

O comprimento do casco resistente, ou melhor, da parte resistente à pressão do navio no SFD deriva do arranjo. Nesse sentido, após alocados os espaços a bordo e verificadas as interferências, obtiveram-se novos comprimentos, diferentes do valor estimado no item 5.5.3.2. Naquele momento, não havia qualquer arranjo do navio e pretendia-se apenas descobrir um peso preliminar e uma orientação no sentido de determinar uma forma minimizante da resistência ao avanço.

Tabela 29 - Comprimento do casco resistente para as versões em estudo

Versões	Potência em kW	Nº de elementos de bateria	Comprimento Resistente [m]	Comprimento com folga [m]
SWATH	3000	12	3x11.6	3x11.6
V1	2600	18	26.639	28
V2	5200	18	30.642	32
V3	5200	36	41.728	42
V2A	5200	18	25.6	25.6

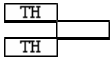
Os comprimentos apresentados na Tabela 29 apresentam um acréscimo de cerca de 1.5 m, no sentido de dar-se uma margem para equipamentos menores que possivelmente não tenham encontrado espaço nesse arranjo superficial. Note-se que não foi dimensionada a máquina para os hidrofólios, nem de vante, nem de ré.

Normalmente, no projeto de um navio, não se costuma arranjar a máquina do leme na fase inicial, mas numa fase de detalhamento. No projeto do submarino, isso é também feito *a posteriori*.

5.12 DIMENSIONAMENTO PRELIMINAR DO PESO E DA ESTRUTURA DO CASCO RESISTENTE (V1,V2,V3)

5.12.1 ESTIMATIVA DA ESPESSURA POR TENSÃO SUPERFICIAL DA PAREDE

Esse tópico estima a espessura do casco resistente, e, em consequência, o peso o estrutural do casco resistente cilíndrico, a partir de considerações de Burcher e Rydill (1994). A seguir essa espessura é comparada à formulação empírica de Laubeuf (apud Aromaa, 2003).

O casco resistente cilíndrico é arbitrado idêntico em diâmetro para todas as versões, ou seja, SWATH₀₀, V1 , V2 , V3  e V2A , assim basta um único estudo dessa natureza.

Burcher e Rydill (1994) explicam que o peso estrutural do casco resistente pode ser obtido pelo dimensionamento preliminar de sua espessura, a partir da tensão normal atuante na parede cilíndrica. Segundo esses autores, esse peso difere do cálculo que leva em conta a flambagem, por erro menor que 10%.

A tensão normal atuante na parede cilíndrica de um vaso de pressão é dada pela equação (14):

$$\sigma = P D / 2t \quad (14)$$

onde P é a pressão externa, D é o diâmetro do vaso de pressão e t a sua espessura.

Entendendo-se que essa tensão deve igualar a tensão de escoamento do material que reveste o casco cilíndrico, optando-se preliminarmente pelo aço HY-80 (tensão de escoamento de 551 MPa), utilizando-se 200 mca como pressão de colapso e $D=3.12$ m, tem-se, para a espessura:

$$t = 2000 \times 3.12 / (551000 \times 2) = 0.006 \text{ m, ou } 6 \text{ mm.}$$

Caso arbitrar-se, apenas momentaneamente, um coeficiente de segurança igual a 2, a espessura teria o valor de 12 mm.

Laubeuf apresenta uma formulação empírica capaz de indicar a profundidade máxima suportada por uma estrutura cilíndrica (apud Aromaa, 2003), apresentada na equação (15):

$$t = 0.03 (P d_{cav} D)^{1/2} \quad (15)$$

onde, na formulação de Laubeuf, P é a pressão de água em $[\text{kg/cm}^2]$, d_{cav} é a distância entre cavernas no casco em $[\text{cm}]$ and D é o diâmetro $[\text{cm}]$.

A formulação de Laubeuf se refere a tensões de escoamento na ordem de 42 kg/cm², assim é conveniente fazer um ajuste para a tensão do HY80, ou seja, 55 kg/cm², o que significa multiplicar por 42/55.1=0.76. Assumindo, preliminarmente, que $d_{cav}=50$ cm, tem-se que a espessura deve ter 13 mm.

O valor de 13 mm é modificado *a posteriori* para 12 mm, em virtude do cálculo por normas que acrescenta a estrutura de cavernas.

5.12.2 PESO ESTRUTURAL DO CASCO RESISTENTE CILÍNDRICO (FUNÇÃO DA ESPESSURA)

Com os valores obtidos pelo item 5.12.1, é possível calcular-se o peso por metro da estrutura do casco resistente cilíndrico.

Chamando-se de W_{cil} esse peso tem-se para o casco resistente um peso de:

$$W_{cil} = \rho_{HY-80} \pi [D^2 - (D-2t)^2] / 4 \quad (16)$$

$$W_{cil} = 7.87 \times 3.1416 \times (3.12^2 - (3.12 - 0.026)^2) / 4 \sim 1 \text{ t/m}$$

Onde a densidade do HY-80 é de 7.87 t/m³. Esse valor é bem próximo do posteriormente encontrado que é da ordem de 1.1 t/m.

5.13 DEFINIÇÃO DA FORMA HIDRODINÂMICA (V1,V2,V3)

O volume resistente foi completamente arranjado de forma a incluir praticamente todos os equipamentos necessários à propulsão, manobra e combate, restando apenas pequena parcela sujeita ao alagamento de alta pressão.

Pode-se afirmar que a disposição do volume resistente determina os valores mínimos das dimensões principais e das formas, porém os valores exatos ainda não são conhecidos.

A envoltória hidrodinâmica do casco resistente, das versões V1

TH

, V2

TH

, V3

TH

 é definida a partir de um estudo de sensibilidade da potência requerida com relação aos parâmetros comprimento, boca, calado (L,B,T).

Procura-se descobrir nesse estudo de sensibilidade se essas versões devem ser de casco de planeio ou de casco de semiplaneio, como citado no item 4.1.8.

A menor potência requerida determina, simultaneamente, a forma das linhas, se planeio ou semiplaneio, e os valores L, B e T.

Para o cálculo dessas dimensões, forma-se um ponto de partida composto por um conjunto de relações a seguir:

- (i) volumes moldados 243 m^3 , 253 m^3 e 319 m^3 , respectivamente para as versões V1

TH

, V2

TH

, V3

TH

;
- (ii) uma boca mínima, maior ou igual ao diâmetro do casco resistente;
- (iii) um comprimento mínimo, maior ou igual ao comprimento do casco resistente que permita a área mínima calculada para funções de patrulha, aproximadamente, 32 m de comprimento;
- (iv) a relação L/B (comprimento sobre boca) deve ser sempre maior que 2.7 m para cascos planadores e menor que 8 ou 9 para cascos de semiplaneio;
- (v) a relação B/T (boca/ calado) que deve ser bem grande, maior ou igual que 3.

5.13.1.1 DIMENSÕES PARA UM CASCO DE PLANEIO

Utiliza-se de um estudo de sensibilidade em torno dos valores mais prováveis para as dimensões do casco de planeio. Assumem-se como limites os seguintes valores:

- (i) relação comprimento boca, $2.7 \leq L/B \leq 4.0$;

- (ii) ângulo de pé-de-caverna mínimo, $10^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$;
- (iii) o volume em m^3 , $\nabla = 243, 253, 319$;
- (iv) a distância entre VCG e o ponto de aplicação da força de atrito, $1.23 \leq f_p \leq 1.37$;
- (v) o calado hidrostático da embarcação, $1.13 \leq T \leq 1.97$;
- (vi) o número de Froude, $0.46 \leq Fn \leq 0.52$;
- (vii) o comprimento, $31.8 \leq L \leq 41.7$;

O estudo de sensibilidade resolve a equação de Savitsky (1964), sem a parcela de spray:

$$EkW = UR_T \quad (17)$$

$$\frac{R_T}{\frac{1}{2} \rho U^2 B^2} = \left[C_{L\beta} \sin(trim) + \frac{(L_m / B)}{\cos(\beta)} \left(1 - \frac{C_{L\beta}}{(L_m / B) \cos(trim)} \right) (C_f + \delta C_f) \right] \quad (18)$$

$$C_{L\beta} = C_{L0} - 0.0065 \beta C_{L0}^{0.6} \quad (19)$$

$$C_{L0} = trim^{1.1} \left[0.012 \left(\frac{L_m}{B} \right)^{0.5} + 0.0055 \frac{1}{C_v^2} \left(\frac{L_m}{B} \right)^{2.5} \right] \quad (20)$$

$$C_v = \frac{U}{\sqrt{gB}} \quad (21)$$

$$L_m = \frac{L_c + L_k}{2} \quad (22)$$

onde trim é o trim dinâmico, em graus, assumido pela embarcação, B é a boca, U é a velocidade de avanço, $C_{L\beta}$ é o coeficiente de sustentação de uma quina com ângulo de pé de caverna β , e comprimento médio L_m .

L_k é o comprimento, a partir da popa, do último ponto de contato da quilha com a água e portanto, $L_k \leq L$. L_c é o comprimento, a partir da popa, do último ponto de contato da boca, B, com a água.

C_v assume um papel análogo ao número de Froude, mas sua dimensão característica é a boca. C_{L0} é o coeficiente de sustentação de uma placa plana de dimensões do casco em V.

A regressão de Savitsky(1964), apesar de se tratar de equações transcendentes de difícil solução, depende de poucos parâmetros de entrada e se presta bem ao estudo de sensibilidade para as velocidades de 18 e 25 nós.

Tabela 30 – Análise de sensibilidade para escolha do casco hidrodinâmico⁴

∇	L	T	L/B	LCG	VCG	B	β	f_p	Fn	BkW ₁₈	BkW ₂₅
253	34.7	1.13	2.7	17.4	1.9	12.9	10	1.37	0.50	3184	6226
253	34.4	1.20	2.8	17.2	2.0	12.3	11	1.36	0.50	3199	6174
253	34.2	1.25	2.9	17.1	2.0	11.8	12	1.35	0.51	3214	6173
253	33.8	1.42	3.2	16.9	2.0	10.6	15	1.32	0.51	2969	6178
253	33.7	1.47	3.3	16.9	2.0	10.2	16	1.32	0.51	2862	6181
253	33.7	1.52	3.4	16.8	2.1	9.9	17	1.31	0.51	2764	6184
253	33.7	1.56	3.5	16.8	2.1	9.6	18	1.30	0.51	2708	6188
253	33.6	1.61	3.6	16.8	2.1	9.3	19	1.29	0.51	2623	6192
253	33.6	1.65	3.7	16.8	2.1	9.1	20	1.28	0.51	2544	6196
253	33.6	1.70	3.8	16.8	2.1	8.9	21	1.28	0.51	2470	6168
253	33.6	1.74	3.9	16.8	2.1	8.6	22	1.27	0.51	2401	6173
253	33.7	1.79	4	16.8	2.2	8.4	23	1.26	0.51	2337	6045
243	31.8	1.27	2.6	15.9	2.0	12.0	12	1.35	0.52	3354	6356
243	31.8	1.33	2.8	15.9	2.0	11.5	13	1.34	0.52	3354	6341
243	31.8	1.38	2.9	15.9	2.0	11.1	14	1.33	0.52	3301	6331
243	31.8	1.43	3.0	15.9	2.0	10.7	15	1.32	0.52	3173	6324
243	31.8	1.62	3.4	15.9	2.1	9.4	19	1.29	0.52	2725	6332
243	31.8	1.67	3.5	15.9	2.1	9.2	20	1.28	0.52	2637	6341
243	31.8	1.71	3.6	15.9	2.1	8.9	21	1.27	0.52	2557	6351
243	31.8	1.76	3.7	15.9	2.1	8.7	22	1.27	0.52	2520	6365
243	31.8	1.80	3.7	15.9	2.2	8.5	23	1.26	0.52	2452	6379
243	31.8	1.84	3.8	15.9	2.2	8.3	24	1.25	0.52	2388	6209
243	31.8	1.89	3.9	15.9	2.2	8.1	25	1.25	0.52	2329	6040
243	31.8	1.93	4.0	15.9	2.2	7.9	26	1.24	0.52	2274	5882
243	31.8	1.97	4.1	15.9	2.2	7.7	27	1.23	0.52	2223	5734
319	41.7	1.16	3.2	20.9	1.9	13.2	10	1.37	0.46	3478	7001
319	41.7	1.22	3.3	20.9	2.0	12.5	11	1.36	0.46	3411	6903
319	41.7	1.27	3.5	20.9	2.0	12.0	12	1.35	0.46	3244	6822
319	41.7	1.33	3.6	20.9	2.0	11.5	13	1.34	0.46	3098	6659
319	41.7	1.38	3.8	20.9	2.0	11.1	14	1.33	0.46	2969	6603
319	41.7	1.43	3.9	20.9	2.0	10.7	15	1.32	0.46	2749	6555
319	41.7	1.48	4.0	20.9	2.1	10.3	16	1.31	0.46	2647	6516

Onde BkW₁₈, BkW₂₅, potência a 18 e 25 nós em KW.

A Tabela 30 apresenta valores da potência calculada com base em Savitsky (1964). O número de Froude arbitrado não garante o planeio, mas serve qualitativamente de apoio à decisão quanto ao regime a ser escolhido.

⁴ O volume é dado por LBT C_b, onde C_b=0.5. L corresponde ao L_k de Savitsky.

Não é necessária a utilização da potência requerida no motor (BHP) para se escolher entre os melhores navios candidatos. De fato, basta a potência requerida pelo casco, o EHP. Para comparar-se com os valores disponíveis de potência instalada, é mais fácil, entretanto, arbitrar-se um coeficiente propulsivo, que no caso é arbitrado em 0.5. Esse é o menor rendimento entre os possíveis para hélices, e iguala-se ao da roda de pá. Para hidrojetos, porém, há rendimentos ainda menores, se operarem fora do ponto de operação, o que não é o caso.

Os valores de volume estão correlacionados com:

- (i) um peso de 249 t, versão V1;
- (ii) um peso de 260 t, versão V2;
- (iii) um comprimento de 41.7 m de casco resistente que é a soma dos três cascos resistentes, na versão V3.

Os pesos referem-se a limites possíveis para os valores de peso do navio (admitindo-se hipótese de equilíbrio neutro quando submerso, o que leva a $\gamma_{\text{resistente}} = \gamma_{\text{água}}$).

O comprimento de 41.7 m de casco resistente refere-se ao arranjo de três cascos resistentes, um central, onde estão os compartimentos habitáveis, habitáculo, e dois laterais, envolvidos em conjunto pelo casco não-resistente. Essa versão é capaz de carregar muito mais potência e armamentos, mas foi desprezada em razão de falta de continuidade estrutural, e por entender-se que seu custo supera em muito o das demais versões.

Escolhem-se como as melhores dimensões o conjunto:

Tabela 31 – Dimensões vencedoras para o volume moldado

	∇	L	T	L/B	LCG	VCG	B	β	f_p	Fn	BkW ₁₈	BkW ₂₅
V1	243	31.8	1.97	4.1	15.9	2.2	7.7	27	1.23	0.52	2223	5734
V2	253	33.7	1.79	4.0	16.8	2.2	8.4	23	1.26	0.51	2337	6045
V3	319	41.7	1.48	4.0	20.9	2.1	10.3	16	1.31	0.46	2647	6516

Nenhum dos cascos deve atender aos 25 nós, porque apresentam um valor de potência requerida bem superior ao de potência instalada, que na versão V1  é de 2600 kW, enquanto nas outras duas é de 5200 kW.

Pode-se afirmar que o casco planador não atende a essas configurações, porque além da potência requerida ser ligeiramente maior que aquele dos cascos de semiplaneio (item 5.13.1.2), pequenas alterações em peso, nas versões semiplaneio não alteram sensivelmente o valor da potência requerida.

Deve-se lembrar que nessa fase de projeto há grande incerteza quanto ao peso.

5.13.1.2 DIMENSÕES PARA O CASCO DE SEMIPLANEIO

Faz-se aqui um novo estudo de sensibilidade. Para estimar a potência o procedimento será semelhante ao anterior: através de série estatística, Holtrop (1984), estima-se o EHP e por hipótese o BHP é o dobro do EHP. Faz-se isso a título de comparação.

Como não se têm ainda as dimensões de uma embarcação. A partir de outros projetos, por fatores de escala, estimam-se boca, calado e comprimento, mantendo fixo o deslocamento.

5.13.1.2.1 HIPÓTESES

- (i) A potência instalada em um navio serve para garantir a sua velocidade máxima;
- (ii) estima-se o EHP pela série de Holtrop (1984), e
- (iii) Quando um cálculo via Holtrop (1984) divergir de um valor prático o cálculo deve ser abandonado;
- (iv) Para navios geometricamente semelhantes seus coeficientes de forma relacionam-se por fatores de escala;
- (v) preliminarmente o BHP é o dobro do EHP (como dito anteriormente, a roda de pá, extremamente ineficiente, tem um coeficiente propulsivo de 0.5);

5.13.1.2.2 ANÁLISE DE CASCOS DE SEMIPLANEIO

Procura-se encontrar um casco que apresente um desempenho hidrodinâmico superior, na velocidade requerida, para um deslocamento preliminar de 250 t ($\sim 243 \text{ m}^3$).

Estuda-se a sensibilidade da potência requerida (calculada por Holtrop (1984)) sobre navios, cujas dimensões estejam disponíveis na literatura e que sejam transformações geométricas por meio de fatores de escala aos cascos de navios semelhantes, de forma que possam satisfazer o deslocamento preliminar.

Trata-se de utilizar navios geometricamente semelhantes e não um casco com calados diferentes, o que acarretaria uma perda de eficiência do casco.

Primeiramente, descarta-se a versão V3, porque não apresenta continuidade estrutural e com isso seu peso é certamente bem maior que o estimado.

Resta comparar os valor de 243 m³ da versão V1 **TH**, e de 253 m³ da versão V2 **TH** e chega-se a valores menores que os encontrados pela regressão de Savitsky (1964).

Procura-se definir qual a série ou o navio-base que servirá para formar a envoltória hidrodinâmica do casco. De fato, nenhum dos cascos que se se vai utilizar pode servir para o casco da versão V1, ou V2, pois seus comprimentos estão muito acima dos comprimentos do casco resistente.

Tabela 32 – Análise de Sensibilidade das Versões V1 **TH** e V2 **T.H**

	V1 Série C	V1 SG40	V1 NPL	V2 Série C	V2 SG-40	V2 NPL
Fator de escala	0.40746	1.04985	0.97771	0.41	1.06	0.99
LWL (m)	48.89	42.62	44.97	49.56	43.20	45.58
B (m)	5.87	7.03	7.43	5.95	7.13	7.53
T (m)	1.75	1.68	1.79	1.78	1.70	1.81
Cx ()	0.78	0.78	0.57	0.78	0.78	0.57
Cwl ()	0.63	0.81	0.69	0.63	0.81	0.69
Cb ()	0.48	0.48	0.41	0.48	0.48	0.41
L/LCB ()	2.03	2.00	2.00	2.03	2.00	2.00
B/T ()	3.35	4.19	4.15	3.35	4.19	4.15
Vol (m³)	243	243	243	253	253	253
Atr (m²)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
App (m²)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
V (nós)	26	26	26	26	26	26
Fn	0.61	0.65	0.64	0.61	0.65	0.63
Taylor	2.05	2.20	2.14	2.04	2.18	2.13
EkW	1787	2373	2776	1829	2441	2864
BkW	3573	4746	5552	3658	4882	5728

onde SG-40 é um navio cujas dimensões estão apresentadas em Sharpe (1996). Série C é um navio da série C de Hamburgo (Carvalho Jr et al., 1998b) e NPL, um casco dessa série. λ são os fatores de escala sobre os navios-base.

Percebe-se claramente que a série C é a que melhor satisfaz o problema, apesar de apresentar os maiores comprimentos.

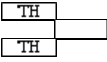
Realiza-se nova transformação sobre os mesmos navios, agora com fatores de escala diferente para comprimento, boca e calado. Nessa nova transformação descarta-se a versão V1, pois ela não pode satisfazer a velocidade de serviço com sua máquina.

Tabela 33 - Fatores de escala diferentes para L, B e T

	Série C	SG-40	NPL
L_{PP} (m)	36.9	40.60	42.15
L_{WL} (m)	36.9	40.60	42.15
B (m)	6.9	6.70	6.96
T (m)	2	1.60	1.68
Vol (m³)	254	210.00	200
LCB (m)	17.33	20.30	21.07
C_x ()	0.78	0.78	0.57
C_{wl} ()	0.85	0.81	0.69
A_{tr} (m²)	1.39	1.00	1.00
A_{pp} (m²)	1.0	1.00	1.00
PFP	-10	10.00	10.00
V (nós)	25	25	24
Fn	0.59	0.61	0.61
Taylor	2	2.04	2.04
B/T	3.45	4.19	4.15
EkW	2316	2179	2439

A coluna Série C continua apresentando menor potência requerida e assim confirma-se como a escolha para a envoltória hidrodinâmica das versões V2 e, por conseguinte, V2A.

5.13.1.3 RESULTADO PARCIAL: OPÇÃO PELO CASCO DE SEMIPLANEIO (V1 , V2, V3)

Em virtude do peso necessário ao casco planador, as versões duplo casco V1 , V2 , V3  estão definitivamente associadas ao casco de semiplaneio. Note-se que o melhor casco planador atingiu o BkW de 6045, a 25 nós, enquanto que o melhor casco de semiplaneio chegou a 5632, na mesma velocidade.

Note-se que o valor encontrado para a potência preliminar da mesma embarcação era de 6448 kW, o que faz um erro de 12% apenas no cálculo da potência instalada via regressão.

O semiplaneio apresenta ainda a virtude de ser menos sensível a variações de peso e, via de regra, ter melhor comportamento no mar. Por essas razões foi a envoltória hidrodinâmica escolhida.

5.13.1.4 RESULTADO PARCIAL: OPÇÃO PELA VERSÃO V2

A versão V2 **TH** carrega a mesma potência da versão V3 **TH** no interior do casco resistente, e carrega mais potência que a versão V1 **TH** (veja 5.22.4). Com isso, a versão V3 **TH** está definitivamente abandonada por sua falta de continuidade estrutural, ou seja, possuir três cascos resistentes e, com isso, carregar um peso desnecessário composto pelos dois outros cascos resistentes.

A versão V1 **TH** foi abandonada também por sua pouca potência instalada. Esta versão não possui a capacidade de atender os requisitos de velocidade, pois seu BkW é praticamente igual ao EkW na velocidade de 25 nós, o que permite estimar-lhe uma velocidade máxima em torno de 17 nós (considerando que as potências se relacionam com as velocidades ao cubo).

5.14 HIDROSTÁTICAS DO SWATH

As hidrostáticas da versão SWATH (obtidas com o programa HECSALV) são a seguir apresentadas, pois são necessárias ao cálculo da potência submersa.

Tabela 34 – Hidrostáticas da versão SWATH

T	(m)	1	2	4.5	7.3	9	9.5
Vol	(m³)	40.07	103.894	160.268	255.82	313.447	320.216
Δ	(t)	40.778	104.028	161.983	265.601	316.747	324.123
B	(m)	10.982	11.182	11.182	11.182	11.182	11.182
LWL	(m)	10.171	10.083	9.863	9.643	9.275	0
LCB	(m)	5.524F	5.524F	5.524F	5.524F	5.524F	5.524F
TCB	(m)	0	0	0	0	0	0
KB	(m)	0.755	1.244	1.754	3.519	4.308	4.443
BMt	(m)	25.241	9.998	0.623	0.541	0.008	0
KMt	(m)	25.995	11.242	2.377	4.06	4.316	4.443
BMI	(m)	12.589	4.953	0.318	1.624	0.262	0
KMI	(m)	13.343	6.197	2.072	5.143	4.57	4.443
TPC	(t)	0.6	0.61	0.06	0.55	0.13	0
MT1	(tm)	0.43	0.44	0.04	0.36	0.07	0
LCF	(m)	5.524F	5.524F	5.524F	5.524F	5.524F	5.524F
Awl	(m²)	58.108	59.539	5.966	60.476	13.045	0
Sm	(m²)	76.613	121.274	255.627	424.357	497.492	532.597
Cb		0.3009	0.3901	0.2674	0.2615	0.2615	0.2531
Cx		0.3523	0.4484	0.3098	0.3057	0.3057	0.2916
Cp		0.8542	0.8699	0.8634	0.8556	0.8556	0.8681
Cwl		0.4473	0.4583	0.0459	0.1004	0.1004	0

5.15 PLANO DE BALIZAS E PERFIL (V2 e V2A)

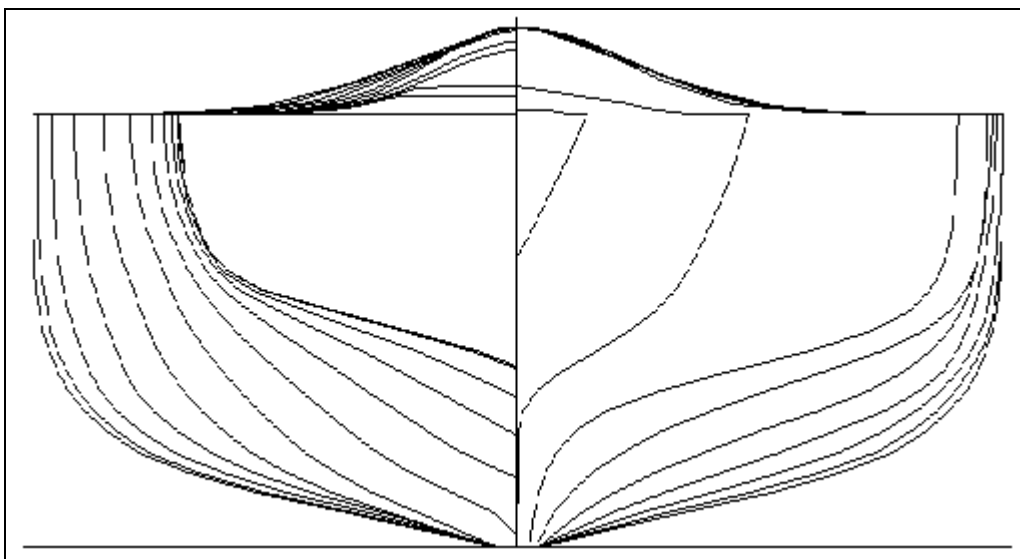


Figura 76 – Balizas. Escala 14:1

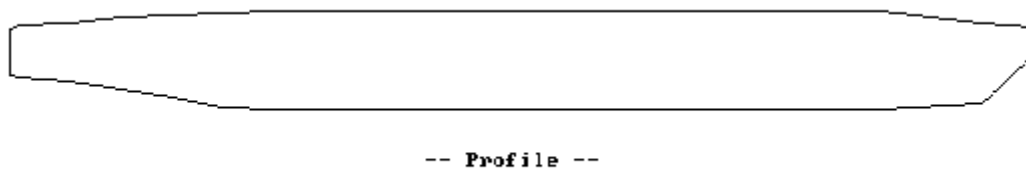


Figura 77 – Perfil. Escala 90:1

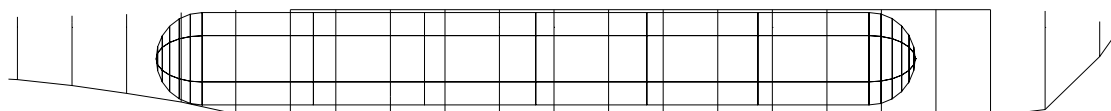


Figura 78 – Perfil com casco resistente.

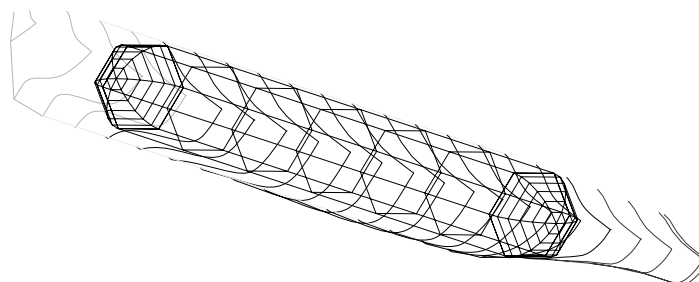


Figura 79 – Modelo em 3D para verificação de interferências

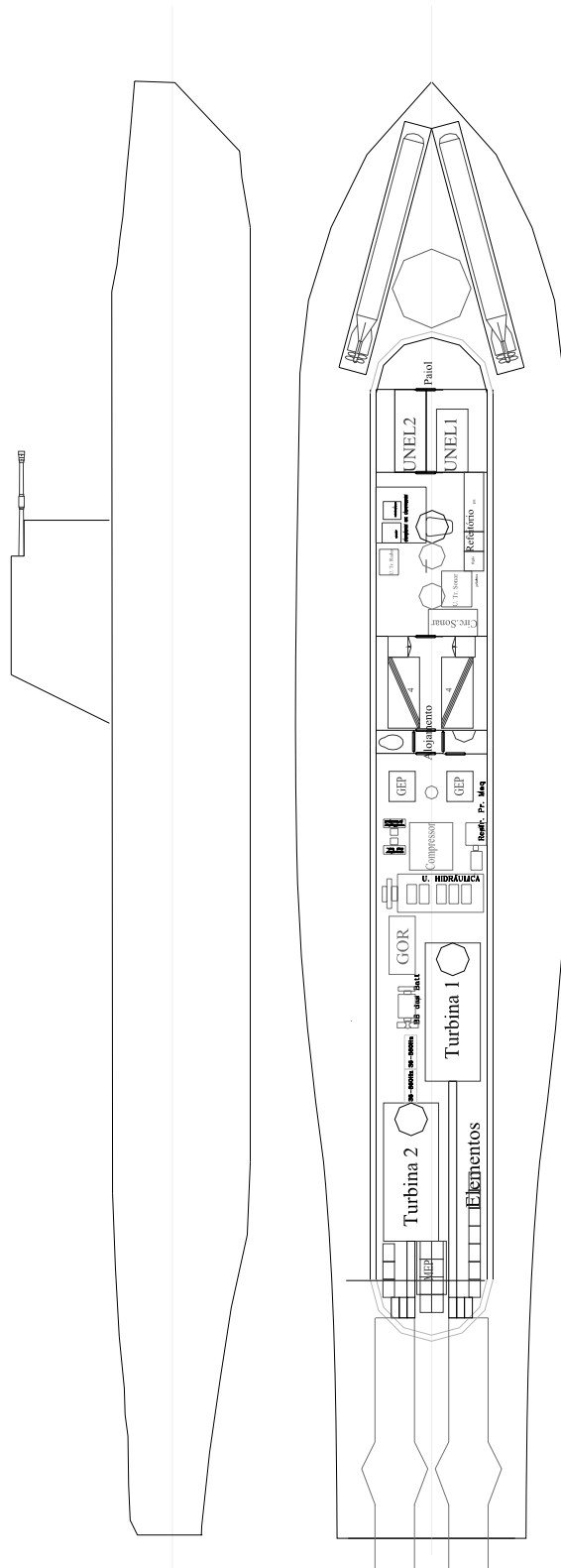


Figura 80 – V2A

5.16 HIDROSTÁTICAS (V2 e V2A)

São apresentadas as hidrostáticas para o navio V2 **T.H** e V2A **TT**:

Tabela 35 – Hidrostáticas da versão V2 e V2A

T	(m)	1	2	2.5	3	4
xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx	xxxx
B	(m)	6.255	6.856	6.888	6.902	6.902
LWL	(m)	33.422	36.864	36.882	36.882	0
Δ	(t)	75	254	361	470	505
Vol	(m ³)	73	248	352	458	493
LCB	(m)	0.062F	0.329F	0.224F	0.152F	0.188F
TCB	(m)	0	0	0	0	0
KB	(m)	0.642	1.272	1.562	1.837	1.933
BMt	(m)	4.051	2.497	1.893	1.487	0
KMt	(m)	4.693	3.769	3.455	3.324	1.933
BMI	(m)	85.218	74.274	55.876	43.88	0
KMI	(m)	85.86	75.547	57.438	45.717	1.933
TPC	(t)	1.3	2.1	2.2	2.2	0
MT1	(tm)	2	5	5	6	0
LCF	(m)	0.333F	0.047F	0.079A	0.069A	4.091A
Ax	(m ²)	130	204	211	214	0
Sm	(m ²)	149	262	302	342	562
Cb		0.2886	0.4865	0.5529	0.6002	0.4845
Cx		0.5878	0.7779	0.8215	0.8508	0.682
Cp		0.491	0.6254	0.673	0.7054	0.7103
Cwl		0.5105	0.8015	0.8305	0.8402	0

As dimensões são do sistema métrico o valor F em LCB significa em direção à proa, a partir da seção mestra, e o valor A, para a popa.

5.17 RESULTADO PARCIAL: ABANDONO DA VERSÃO SWATH

A versão SWATH foi abandonada por duas razões: pela altura da embarcação, que se reflete na dificuldade de ocultação de suas formas; e por uma espiral divergente de peso e potência.

A espiral divergente de peso e potência significa que o SWATH não consegue carregar a propulsão necessária para exercer a funcionalidade do navio patrulha, porque não consegue carregar as turbinas a gás necessárias, não somente em função do peso, mas também em função, ora da descarga de gases, ora da do centro de gravidade do gerador (quando se localiza no convés superior).

Com o uso das curvas hidrostáticas e da regressão para potência instalada, pode-se estimar a velocidade do navio da versão SWATH, que o valor correspondente ao calado de 4.5, alcança a velocidade na superfície é de 19 nós, baixa.

A resistência ao avanço apresentada por um SWATH é basicamente resistência friccional. Não há queda de pressão apreciável na popa dessa embarcação em razão da superfície livre, o que faz sua resistência na superfície ser praticamente a de um corpo submerso. Assim pode-se dizer que seu bhp submerso está relacionado a seu bhp na superfície na razão de suas áreas molhadas:

$$\text{bhp}_{\text{submerso}} / \text{bhp}_{\text{superfície}} \sim \text{Sm}_{\text{submerso}} / \text{Sm}_{\text{superfície}} \quad (23)$$

$$\text{bhp}_{\text{submerso}} = 1.9 * \text{bhp}_{\text{superfície}} \quad (24)$$

5.18 SISTEMAS AUXILIARES (SOMENTE VERSÃO V2)

Os sistemas auxiliares foram dimensionados para todas as versões. Explicita-se somente o dimensionamento para a versão V2A. A Tabela 36 apresenta os muitos sistemas e suas dependências.

A denominação de sistemas auxiliares é imprópria. Na verdade, tratam-se dos sistemas que permitem aos demais sistemas funcionar, sendo, portanto, essenciais.

Esses sistemas no híbrido podem dar causa a sua inviabilidade. Como se verá, o volume necessário ao condicionamento de ar ambiente, por exemplo, é bem significativo. Apesar de leve o condicionamento de ar ocupa um volume a bordo que só pode ser satisfeito pelo espalhamento do sistema pelo navio.

Tabela 36 - Relação entre os sistemas auxiliares e os demais sistemas de bordo

Sistema auxiliar	Dependências
aguada (SWBS 536)	trip, aut
(SWBS 536) GOR	trip
ar comprimido (SWBS 512)	prof, VTL, CI
(SWBS 512) compressor	
ar condicionado (SWBS 514)	BkW, trip, D
compensação (SWBS 530)	VTC
controle de atmosfera (SWBS 552)	trip
controle de avarias (cav - SWBS 664)	Δ
energia elétrica	BkW, L
lastro principal (SWBS 530)	VTL
linha de eixo (SWBS 243)	BkW, rpm, material
óleo combustível	BkW
resfriamento das baterias (SWBS 540)	nº de elementos
resfriamento dos MCPs (SWBS 260)	BkW
respiração em emergência	trip
separação de água e óleo (SWBS 264)	BkW
tratamento de águas servidas (SWBS 592)	trip, aut
(SWBS 592) tanques de efluente e séptico	
trimagem (SWBS 530)	VTC
ventilação (SWBS 512)	BkW, trip, Δ

A filosofia convencional de tratamento desses sistemas em projeto não pode ser adotada no híbrido. Nele se exige um tratamento bem mais cuidadoso. Verifica-se, de fato, se nessa etapa de projeto, através de arranjo se possível, se os espaços necessários correspondem aos espaços disponíveis. Certos tanques, por exemplo, como

o tanque sanitário, devem ser alocados fora do casco resistente sob pena de inexequibilidade.

Ao longo do capítulo se faz sempre referência ao SWBS do sistema, ou seja, a sua classificação de grupo de peso, que é a ótica do trabalho, alocação de pesos e volumes.

A mesma verificação que se faz quanto ao volume ocupado por esses sistemas, é feita em relação aos pesos. As formulações empíricas de peso são comparadas aos pesos de equipamentos escolhidos.

Existe grande interatividade entre o arranjo, o peso e os sistemas auxiliares, notadamente os que dependem de volumes de tanque e deslocamento. Além disso, os sistemas de linha de eixo, óleo combustível, lastro influenciam sensivelmente o peso da embarcação.

Enfim, inicia-se esse estudo para a versão V2  e, quando couber, para a versão V2A , com o descarte das versões com casco cilíndrico, ou seja, V1 , V3  e SWATH . Essa análise serve, entretanto, às versões V4 , V5 , V5A  V6 , com as devidas modificações.

5.18.1 SISTEMA DE AR COMPRIMIDO (SWBS 512)

O processo de mergulho e emersão baseia-se em diferentes tipos de sistemas, não exaustivamente:

- (i) sistema de ar comprimido (submarinos modernos);
- (ii) diferenças de densidade de água do mar (planadores subaquáticos);
- (iii) submersão dinâmica com o auxílio de hélices (ROVs e alguns dos primeiros submarinos).

O sistema de comprimido de alta pressão além de expulsar a água dos Tanques de Lastro (TL), além de outras funções.

Apesar de dito auxiliar, esse sistema tem importância capital por seu relativo peso e por significar a viabilidade ou não do projeto do submarino. Por essas razões faz-se necessária a eleição desse sistema para análise mais detalhada.

5.18.1.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE AR COMPRIMIDO

5.18.1.1.1 CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DE AR COMPRIMIDO EM SUBMARINOS

O estado da matéria fica determinado por duas de suas propriedades termodinâmicas. Para gases, comumente usa-se pressão e temperatura para a determinação de seu estado. Portanto, para o ar comprimido nessa abordagem:

$$P_1 Vol_1 / Temp_1 = P_2 Vol_2 / Temp_2 \quad (25)$$

onde P é a pressão, Temp é a temperatura e Vol é o volume ocupado pelo gás.

A estratégia que vem sendo utilizada é transportar-se ar comprimido que expandido possa ocupar o volume dos tanques de lastro expulsando a água lá depositada de forma a diminuir o peso e permitir flutuabilidade positiva.

As ampolas ou garrafas de ar comprimido são a forma de armazenamento para os submarinos. Seu enchimento só se opera na superfície, pois o compressor não opera submerso, donde não há possibilidade de enchê-las nessa condição.

O ar comprimido deve vencer a pressão dos orifícios de alagamento dos TL que se encontram em torno de 10m de profundidade, num submarino típico (cujos diâmetros, CR, variam de 4 a 10 m, veja Tabela 116). Assim, a pressão do mar, atuando nos orifícios de alagamento é de cerca de duas atmosferas. Daí, para o completo esvaziamento dos tanques, o volume de ar na pressão atmosférica é o dobro do volume dos TL.

Burcher e Rydill (1994) prevêem a possibilidade de ocasiões em que o submarino ao emergir, tenha que submergir, logo em seguida, em emergência, para evitar colisões ou adversários, antes que tenha tempo de recarregar as ampolas de ar. Para isso, essa capacidade armazenada de ar comprimido deve permitir que o submarino tenha, pelo menos, três tentativas de emersão.

Assim o volume de ar cresce, 3 vezes, uma para cada tentativa, ou seja, 6 vezes o volume dos TL.

5.18.1.1.2 CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO DE AR COMPRIMIDO DO HÍBRIDO

A pressão dos orifícios de alagamento do híbrido é de menos de 2 atm, pois o calado do híbrido é baixo. O peso das garrafas de ar comprimido é elevado, cerca de meia tonelada, donde é necessário minimizar-se essa capacidade. O valor de três

tentativas de Burcher e Rydill (1994) não parece determinístico, mas advém de experiência. O *modus operandi* do híbrido é diferente e, portanto, pode-se, sem maiores consequências aproximar o valor de 6 vezes o volume dos tanques de lastro para cerca de 4 vezes, com razoabilidade lógica.

O ar comprimido é tipicamente armazenado sob uma pressão de 250 bar (246 atmosferas). Da equação dos gases perfeitos, temos:

$$P_{ATM} \times (4V_{TL}) = P_{GARRAFA} \times V_{AR COMP} \quad (26)$$

onde P_{ATM} é a pressão atmosférica, V_{TL} é o volume dos Tanques de Lastro, $P_{GARRAFA}$ é a pressão da garrafa (246 atm), $V_{AR COMP}$ é o volume de ar comprimido

O valor do volume dos tanques de lastro deve ser, no caso do híbrido, aproximadamente igual à diferença entre deslocamento imerso e o deslocamento na superfície, assim :

$$V_{TL} = (\Delta_{imerso} - \Delta_{superfície}) / \rho \quad (27)$$

onde $\Delta_{superfície}$ – deslocamento na superfície, Δ_{imerso} – deslocamento na condição submersa, ρ - densidade da água do mar à temperatura média de 20° C

Assim tem-se: $P_{ATM} \times (4V_{TL}) = P_{GARRAFA} \times V_{AR COMP}$; $1 \text{ atm} \times 4 \times 280 \text{ m}^3 = 246 \text{ atm} \times V_{AR COMP}$

$$V_{AR COMP} = 4.55 \text{ m}^3$$

Note que V_{TL} foi aproximado para 280 m³, o valor mais próximo seria 270 m³, isso na verdade representa um pequeno coeficiente de segurança adicional.

As garrafas de ar utilizadas são as tipicamente utilizadas em submarinos e têm as seguintes características:

Tabela 37 - Especificações das ampolas de O₂

capacidade	340 l;
peso : (vazia)	500 Kg
peso : (cheia);	600 Kg
dimensões lineares ::	φ457 e 2905 mm
pressão	250 bar (246 atm)
volume externo	0.48m ³

Como se pode ver o peso e as dimensões dessas garrafas afetam consideravelmente uma embarcação com as características do híbrido. O volume ocupado por cada uma delas é de 0.48m³

O número de garrafas de ar é dado por:

$$n_{GARR} = V_{AR COMP} / V_{GARRAFA} \quad (28)$$

onde n_{GARR} é o numero de garrafas , $V_{GARRAFA}$ - volume da garrafa (0.340 m³).

$n_{GARR} = 4.55/0.340 \sim 14$ garrafas. Isso corresponde a um peso de 7 t para a versão com 280 m³ de lastro.

5.18.1.1.3 CAPACIDADE DE VAZÃO DOS COMPRESSORES

Os submarinos são dimensionados da seguinte forma (CARVALHO Jr. et al.,1998b):

$$Q = f(Vol_{TG}, P_{GARRAFA}, P, CI) \quad (29)$$

onde f é uma função qualquer $P_{GARRAFA}$ é pressão das garrafas de ar comprimido quando cheias (bar abs), P é a pressão correspondente à máxima cota de operação (bar abs), CI é o coeficiente de indiscrição e Vol_{TG} : volume total das garrafas (m³)

Para o híbrido, cuja natureza de operação é única, seria interessante dimensionar de forma diferente, sem levar em conta o coeficiente de indiscrição. Assim espera-se que os compressores devam comprimir o ar à pressão final de 250 bar num tempo mínimo. Assim, dimensiona-se procurando minimizar-se o peso dos compressores. Para tanto, opta-se por um grande compressor, que tem a capacidade de abastecer o navio em aproximadamente 2.5 h.

Tabela 38 - Características do compressor

Modelo	JP SAUER & SOHN WP 5000
Capacidade	105 m ³ /hora a 250 bar
Comprimento	1215 mm
Largura	1095 mm
Altura	1570 mm
Peso	1650 Kg
Potência	28.5 kW

5.18.1.2 RESUMO DO SISTEMA

Para cada versão de semiplaneio do híbrido, apresenta o peso em tonelada do sistema:

Tabela 39 - Dimensões do sistema de ar comprimido para as versões V1,V2,V3

Item	V1 	V2	V3 
Compressor	1.65	1.65	1.65
Garrafas (peso seco em t)	9	12.8	14
Garrafas cheias	5.4	7.68	8.4
Número de garrafas	14	13	9
Total do grupo [t]	10.65	14.45	15.65

5.18.2 SISTEMA DE AGUADA (SWBS 536)

O sistema de aguada nos navios militares e submarinos é o sistema de água doce. Esse sistema tem a finalidade produzir e armazenar água destinada ao consumo humano, destinado a higiene e outras finalidades como tais como repor perdas nos circuitos de refrigeração.

A água potável dos submarinos costuma ser provida ou por um grupo destilatório ou por grupos de osmose reversa (GOR). Pela natureza do híbrido apenas o GOR é aceitável: compacto e leve, na medida que economiza a água dos tanques de aguada.

O GOR foi concebido para remover a maioria dos sais dissolvidos, material orgânico, bactérias e sólidos em suspensão encontrados na água do mar, com o objetivo de transformá-la em água potável com elevado índice de purificação. Trata-se de um poderoso filtro cujas dimensões e complexidade dependem do estado da água de alimentação e do grau de purificação desejado.

O híbrido não prevê redundância nesse sistema, diferentemente dos navios de guerra mais sofisticados, por sua pequena tripulação.

5.18.2.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

Critérios de projeto:

- (i) utilizar água potável tanto para consumo humano, quanto para banhos;
- (ii) 3 litros/tripulante/dia para beber (ABS);
- (iii) o grupo de osmose proverá, no mínimo, 30 litros/tripulante/dia (GABLER, 1991);

O valor de 30 litros/tripulante/dia refere-se a submersíveis antigos com baixo grau de conforto. Com isso, quanto mais água gerada melhor o conforto. Dessa forma optou-se por aumentar esse valor em pelo menos 10%.

5.18.2.1.1 GRUPO DE OSMOSE REVERSA

Assim a capacidade dos grupos de osmose reversa pode ser dada por:

$$C = c \times \text{Trip} \quad (30)$$

onde C é a capacidade total diária de geração de água doce; c – consumo de água doméstico = 30 litros / dia; Trip – tripulação = 6 homens.

Preliminarmente adotou-se o modelo SEA RECOVERY, SRC 10m3, com as seguintes características:

Tabela 40 - Características do Grupo de Osmose Reversa (GOR),

Capacidade	9.84 m ³ /dia
Comprimento	1.47 m
Largura	0.66 m
Altura	0.66m
Peso	260 Kg seco, 295 Kg cheio
Potência	5 kW

Esse GOR superestima as necessidades de bordo, mas é compacto. Recomenda-se, no futuro, sua substituição por dois outros de menores dimensões e capacidades.

A razão principal que leva um submarino a adotar também tanques de aguada é permitir avaria dos grupos de osmose reversa. Do que já se disse anteriormente, os tanques de aguada têm os seguintes volumes no híbrido:

$$T_{\text{aguada}} = c_{\text{mínimo}} \times \text{trip} \times \text{aut} \quad (31)$$

Onde $c_{\text{mínimo}}$ é consumo por homem por dia mínimo, trip é a tripulação e aut, a autonomia em dias. O tanque hidróforo tem 50 litros, ou seja, ocupa um volume de aproximadamente 0.4 x 0.5 x 0.5 m, no interior do casco resistente.

5.18.3 SISTEMA DE TRATAMENTO DE ÁGUAS SERVIDAS (SWBS 592)

O esgoto, principalmente as águas negras, quando sem tratamento, ainda que por poucas horas, pode gerar gases altamente nocivos. Indica-se, para tanto, um sistema de ventilação forçada para dispersar o ar potencialmente infectado.

Os dejetos humanos apresentam um razoável potencial infeccioso, pois podem estar contaminados por micróbios que existem normalmente no sistema gastrointestinal, e que podem ser perigosos quando inalados ou em caso de cortes ou arranhões de pessoal.

O sistema deve ser tão liso quanto possível, de forma a facilitar a limpeza e não concorrer para o acúmulo de dejetos. Nesse sentido, quando operando em condições normais, a planta de tratamento proporciona adequado grau de proteção, pois oferece um fluxo contínuo de dejetos que são processados e descarregados de bordo.

Os principais sistemas de águas servidas empregados a bordo de navios são: mecânicos, químicos ou eletrocatalíticos e biológicos.

O mais compacto é o sistema eletrocatalítico. O processo consiste do bombeamento de esgoto macerado para uma célula eletrocatalítica, onde a água salgada

causa um fluxo de corrente entre os eletrodos. Esta corrente oxida a parte sólida e, pela dissociação eletrolítica do cloreto de sódio presente na água salgada, e conseqüente formação de cloro, permite a desinfecção das águas servidas.

Compõem o sistema um tanque séptico, uma célula eletrocatalítica, bomba maceradora, tanque de efluente, bomba de esgoto, válvulas e canalizações.

5.18.3.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

Os tanques de efluentes do híbrido são projetados para coletar a produção ao longo de um período que aqui é arbitrado igual à autonomia. Esta *capacidade* de armazenamento leva em conta o fato de que o híbrido deverá esgotar seus tanques de efluentes em momentos adequados, quer seja para evitar sua detecção, quer seja para evitar descarregar em locais proibidos pela legislação ambiental (MORRIS et al., 1984).

Os tanques devem ter a capacidade de coletar tanto as águas cinzentas (água destinada a lavagens, provenientes de pias, ralos e da cozinha), quanto as águas negras (contendo excreções, provenientes de sanitários). Os tanques serão não-estruturais.

A produção de esgoto está ligada ao consumo de água. Diariamente o conjunto de águas negras e cinzentas atinge para navios de superfície, segundo a US Coast Guard, (MORRIS et al., 1984), 230 litros/homem /dia.

GABLER (1991) considera um consumo de água potável de cerca de 3 l/homem /dia, e de 10 a 25 l/homem/dia para água destinada à lavagem.

Há uma diferença entre as referências Adota-se então o critério de dimensionamento de um tanque séptico por Gabler (1991), pois parece mais razoável.

Parece pouco provável que um navio que produza 30 litros/homem/dia possa gerar 230 litros/homem/dia de lixo. Diante desse quadro parece existir muita perda em forma de vapor d'água. O total de Gabler é, portanto, 28 litros /homem/dia.

Seguindo a tradição de projeto dessas redes, cria-se um tanque séptico e outro de efluentes (do latim, expulsos). Portanto deve-se ter:

$$V_{\text{TANQUE SÉPTICO}} = \text{consumo diário} \times \text{tripulação} \times \text{nº de dias} \quad (32)$$

Onde $V_{\text{TANQUE SÉPTICO}}$ – volume do tanque séptico, $V_{\text{TANQUE EFLUENTE}}$ – volume do tanque de efluentes, n- número de dias de imersão

$$V_{\text{TANQUE EFLUENTE}} = V_{\text{TANQUE SÉPTICO}} \quad (33)$$

onde $V_{\text{TANQUE SÉPTICO}}$ – volume do tanque séptico, $V_{\text{TANQUE EFLUENTE}}$ – volume do tanque de efluentes

O mercado fornece conjuntos para tratamento de águas servidas. Nesse trabalho estimou-se a partir de um valor comercial com as seguintes capacidades (a coluna estimador representa a razão entre as necessidades e o equipamento dado):

Tabela 41 –Conjunto para tratamento de águas servidas

	Eltech Systems Corp.	Estimador	Estimado
Equipamento	Omnipure 12 MX PM	-----	-----
Capacidade	28000 l/dia	$R_{\text{Capacidade}}$	168
Comprimento	1.321 m	$R_{\text{Capacidade}^{1/3}}$	0.240
Altura	1.524 m	$R_{\text{Capacidade}^{1/3}}$	0.277
Largura	0.610 m	$R_{\text{Capacidade}^{1/3}}$	0.111
Peso em Operação	0.5 t	R_{Volume}	0.003
Potência de Alimentação	7 kVA	$R_{\text{Capacidade}}$	0.042

Onde $R_{\text{capacidade}}$ – Razão entre as capacidades do aparelho e a necessária, R_{volume} – razão entre o volume da unidade e o novo volume obtido através das dimensões ajustadas

5.18.4 SISTEMA DE SEPARAÇÃO DE ÁGUA E ÓLEO (SWBS 264)

Tomam-se os valores médios de consumo de óleo lubrificante de veículos automotores. Tem-se, então:

Tabela 42 – Estimativa da capacidade do separador de água e óleo

Veículo Automotor	km	Troca	4000
	km/h	$V_{\text{média}}$	60
	horas	$\text{Troca}/V_{\text{média}}$	67
	litros	Litros/Troca	4.5
	kw	Potência do Motor	42.5
Híbrido	l/kw/h	Razão de Extrapolação	3.74E-05
	l/h	Para 6000 kW	0.224

Um equipamento capaz de atender o navio seria o VICTOR MINISEP, com as seguintes características:

Tabela 43 – Características do separador de água e óleo.

Equipamento	VICTOR MINISEP
Capacidade	500 l/h
Comprimento	0.609 m
Altura	1.207 m
Largura	0.292 m
Peso em Operação	0.254 t

5.18.5 SISTEMA DE AR CONDICIONADO (SWBS 514)

O sistema de ar condicionado é função basicamente do tamanho, do número de compartimentos condicionados, além da temperatura interna do submarino, bem como da carga térmica proveniente dos equipamentos e tripulantes.

A finalidade do ar condicionado é manter a temperatura nos limites toleráveis de funcionamento dos equipamentos eletrônicos, bem como para controlar a umidade do ar, em submarinos comuns. No híbrido, acrescenta-se a finalidade de prover conforto à tripulação.

Diferentemente de navios de superfície, o submarino condiciona também o compartimento da praça de máquinas, pois não há como promover adequada ventilação.

GATES (1987) afirma que a temperatura do ar e da água entre o equador e os trópicos pode chegar, respectivamente, a 34.5°C e 33°C, nos meses de verão. Isso bem com os dados de potência dissipada dos equipamentos de bordo influi diretamente no cálculo da carga térmica.

O sistema pode operar com três possibilidades:

- (i) sistema de água gelada, ou de expansão indireta;
- (ii) com dois dutos de alta velocidade (o mesmo de aeronaves);
- (iii) sistema de expansão direta.

5.18.5.1 SISTEMA DE ÁGUA GELADA

Nesse sistema operam lado a lado UCAs (unidades condicionadoras de ar) e URAs (unidades refrigeradoras de água). As URAs que refrigeram a água gelada, destilada ou desmineralizada, a 6.5°C, numa taxa de fluxo constante. Por sua vez, o ciclo de refrigeração da URA opera com R-134 A, que não contém CFC.

A água gelada é então bombeada a uma taxa de fluxo constante, em circuito fechado, em direção às UCAs, onde trocará calor com o ar a ser refrigerado.

5.18.5.2 SISTEMA DE DOIS DUTOS DE ALTA VELOCIDADE

Este sistema, conhecido também como sistema Tipo G, vem nos últimos anos ganhando muita popularidade no ramo da construção naval. Nele, todo o ar é filtrado, resfriado e desumidificado nas unidades centrais de tratamento. A disposição do tipo ventilador – serpentinas é normalmente necessária para garantir a eficiência do projeto.

Um ventilador de alta pressão é necessário para promover a circulação do ar através do sistema de dois dutos ou tubulações em altas velocidades (aproximando-se dos 30 m/s). Um duto ou tubulação circula o ar quente enquanto o outro duto circula ar frio. Um reaquecedor a vapor na unidade central de tratamento aquece o ar de acordo com a necessidade imposta pela temperatura externa de bulbo seco.

O insuflamento do ar quente e do ar frio é feito em uma câmara de mistura existente em cada espaço condicionado. Cada câmara de mistura possui uma válvula de controle que proporciona a quantidade necessária de ar quente e ar frio para satisfazer as necessidades do termostato do ambiente condicionado. Qualquer temperatura dentro dos limites de capacidade da máquina principal de refrigeração é facilmente obtida e mantida através deste sistema exceto pelas variações impostas pela carga térmica em ambientes adjacentes.

As câmaras de mistura do ar incluem reguladores internos os quais mantêm constante o volume de ar total fornecido aos vários ambientes exceto por ajustes feito no ar de insuflamento para os ambientes em uma parte anterior da linha de insuflamento.

Algumas vantagens deste tipo de sistema, comparado com outros que forneçam tanto aquecimento quanto resfriamento aos espaços servidos são listadas abaixo (BOGOSIAN NETO e LOPES, 1997):

- (i) Todo o equipamento de condicionamento e tratamento do ar é centralizado facilitando a manutenção e operação;
- (ii) Este sistema pode aquecer e resfriar espaços adjacentes simultaneamente sem mudanças de ciclos e com um mínimo de controles automáticos;
- (iii) A partir do momento que somente ar é distribuído pelas UCAs (unidades de condicionamento de ar) nenhuma rede de água, vapor, equipamentos elétricos ou cabeamentos são necessários nos espaços condicionados;
- (iv) Como todo o equipamento de tratamento do ar é centralizado, sistemas de expansão direta (comentados no próximo tópico) de halocarbonetos é possível eliminando todo os equipamentos intermediários do fluido secundário.

5.18.5.3 SISTEMA DE EXPANSÃO DIRETA

Esse sistema utiliza também UCAs. Nelas o ar é resfriado por meio de serpentinas. Pode-se instalar uma UCA em cada compartimento de interesse. Assim elegeram-se três UCAs: praça de máquinas, habitáveis e comando.

O ar é enviado a partir de um compressor na praça de máquinas para a UCA e então se processa o controle ambiental do compartimento.

É o sistema adotado no híbrido por ser menos ruidoso que o ar de alta velocidade e ao mesmo tempo mais leve que o de expansão indireta.

5.18.6 SISTEMA DE VENTILAÇÃO (SWBS 512)

Compõe-se de dois ventiladores de grande capacidade: o central e o das baterias. A importância desse sistema refere-se à manutenção de baixos níveis de H_2 , bem como reduzir a pressão no interior do navio na situação de esnórquel.

Quando esnorqueia, o ventilador das baterias aspira o ar fresco do mastro de esnórquel e o circula pelos compartimentos de baterias, retirando ar com H_2 liberado pelas baterias e descarregando na praça de máquinas, onde servirá para a combustão dos diesel-geradores. O ventilador principal circula o ar que passa por um resfriador/aquecedor, sendo então distribuído através do navio.

Na situação submersa, o ventilador principal promoverá a circulação de ar por todo o navio, inclusive pelos compartimentos de baterias, de modo que se assegure uma concentração de H_2 menor que 2%, já que as concentrações maiores podem representar riscos de explosão.

5.18.7 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE VENTILAÇÃO E AR CONDICIONADO

O dimensionamento desses sistemas envolve cálculos por demasiado minuciosos e estão fora do escopo do problema.

É possível, entretanto, executar um dimensionamento simplista que leve em conta apenas o calor produzido pela turbina para se ter uma idéia do peso e volume do sistema no híbrido.

A turbina Vericor ASE8 VOC de 525 kW perde cerca de 100000 Btu/hr para o ambiente. Assim tem-se uma razão de perda em kW de 29.3 kW dissipados em 525 kW de potência útil. Isso cria um coeficiente de 6% de perdas para o ambiente da potência nominal.

O equipamento abaixo é um equipamento composto de uma unidade interna e outra externa. Aparentemente o volume interno requerido é muito grande, mas isso é distribuído ao longo do navio de forma que não representa grandes problemas.

Tabela 44 – Memorial de estimativa do ar condicionado

		Estimador	Estimado
Unidade Interna -UI	42DQC24226		
Unidade Externa - UE	38NWB24226	-----	-----
Capacidade	7		39
Nº de unidades	1	R _{Capacidade}	6
Vazão Média [m³/s]	0.269	R _{Capacidade}	1.50
Profundidade [m]	0.5		
Altura [m]	0.44		
Largura [m]	0.66		
Profundidade-UI [m]	0.22		
Altura-UI [m]	0.36		
Largura-UI [m]	1.115		
Peso em Operação [kg]	0.0805	R _{Capacidade}	0.45
Potência de Alimentação [kW]	3	R _{Capacidade}	16.7
Fator de segurança e peso final		2	0.9

Onde R_{capacidade} é a razão entre a capacidade Capacidade do equipamento e a Capacidade requerida

A parte externa que no projeto consta de ventilador e serpentinas para resfriamento da água será substituída por trocadores de calor, que de alguma forma devem manter o peso dessas serpentinas, os ventiladores serão substituídos por bombas e a troca de calor será feita com a água muito mais eficiente.

O sistema final não deverá ser esse, mas a intenção é demonstrar a viabilidade. Usando de um fator de segurança de 2 em peso, para o fato de que as tubulações serão resistentes à pressão, o peso final será de 6 t.

A Figura 81 apresenta o arranjo de apenas dois desses elementos simétricos ao centro do navio simultaneamente ao tubo protetor externo que será necessário construir para refrigerar o sistema. UI é a unidade interna e UE, a externa.

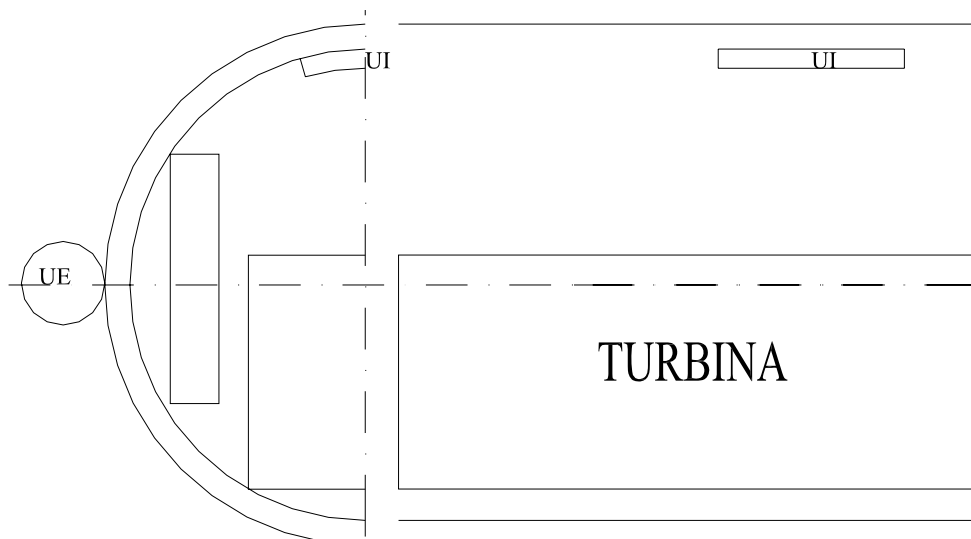


Figura 81 - Corte no arranjo do casco resistente mostrando o trocador externo de calor do ar condicionado em formato cilíndrico (UE) à esquerda.

5.18.8 SISTEMA DE CONTROLE DE ATMOSFERA (SWBS 552)

Controlar a atmosfera significa controlar o nível dos poluentes. Os principais poluentes encontrados na atmosfera do submarino são apresentados na Tabela 45. Dela é possível compreender a gravidade do problema.

Tabela 45 - Poluentes

POLUENTES	CAUSAS	EFEITOS
CO ₂	Respiração e combustão em geral	Respiração difícil, perda de consciência e morte
CO	Fumo, combustão incompleta em geral	Envenenamento do sangue
H ₂	Baterias	Perigo de explosão e danos à saúde
HIDROCARBONETOS	Vapores de óleo combustível e lubrificantes; vapores da cozinha	Perigo de explosão
FREON 12	Vazamentos do sistema de refrigeração	Asfixia, tóxico

O híbrido nas versões V1 **TH**, V2 **TH**, V3 **TH** V2A **TJ** deve passar a maior parte de sua operação no fundo, ou a baixa velocidade, portanto a atmosfera interna passa a ser um fator de importante consideração e esse passa a ser um sistema vital.

5.18.8.1 PROCESSOS DE REVITALIZAÇÃO CONHECIDOS

5.18.8.1.1 ABSORÇÃO DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) POR PROCESSO QUÍMICO REVERSÍVEL

Esse processo lembra muito o que se passa com a hemoglobina na circulação sanguínea: a absorção do CO₂ se realiza por reação química com a monoetanolamina à temperatura ambiente, e a posterior separação através de elevação de temperatura, sendo o CO₂ desprendido e bombeado para fora do submarino.

Gasta-se energia para: circular a monoetanolamina para forçar o ar ambiente através do equipamento de purificação; para aquecer a monoetanolamina rica em CO₂ ; para bombear o CO₂ para fora do submarino; para promover a circulação no resfriador da monoetanolamina pobre em CO₂ e resfriar o ar purificado.

O equipamento é instalado dentro do casco resistente e possui uma comunicação com o exterior para eliminação do CO₂. Apesar de a monoetanolamina percorrer um ciclo fechado, existe uma pequena perda, sendo necessária a reposição depois de um período de funcionamento.

O peso e o volume do equipamento não são divulgados, mas são muito grandes em comparação aos demais.

5.18.8.1.2 ABSORÇÃO DE CO₂ POR PROCESSO QUÍMICO IRREVERSÍVEL

Nesse processo a absorção do CO₂, faz-se por contato direto com a substância química absorvedora, sendo o processo irreversível.

A circulação de ar e conseqüente revitalização é garantida através de um motor elétrico e, no caso de falta de energia elétrica, pode ser feita por uma turbina movida a ar comprimido, proveniente das garrafas de ar de alta pressão do submarino, esse processo parece conveniente para o híbrido.

5.18.8.1.3 GERADOR QUÍMICO DE O₂

Através da “queima” de uma “vela de O₂”, também conhecida como cartucho, dá-se origem à liberação desse gás, que é filtrado antes de ser adicionado à atmosfera interior no submarino.

As velas de oxigênio são dispostas na praça de manobras, em um aparelho simples, que libera o oxigênio no ar, havendo desprendimento de calor.

Em razão de se tratar de reação química exotérmica, o procedimento é bastante sujeito a incêndios, existindo mesmo o perigo de combustão espontânea. É necessário, portanto, observar um procedimento bastante rigoroso de operação de combate a incêndios.

O processo cria também a necessidade de haver o controle da concentração de um subproduto da reação, no caso o cloro, cuja concentração não deve ultrapassar a 0.1 ppm.

Outra limitação “velas de oxigênio” é que o estoque dentro do submarino deve ser bastante controlado, pois a “vela” tem uma vida finita que pode ser reduzida pelo mau acondicionamento.

5.18.8.1.4 QUEIMADOR DE H_2 , CO E HIDROCARBONETOS.

O queimador é constituído apenas de uma fonte quente, alimentada com energia elétrica.

No queimador o combustível, H_2 , CO ou hidrocarbonetos, entra em contato com o comburente, O_2 ambiente, que em presença de uma fonte quente, dá origem à água sob forma de vapor, no caso do H_2 ; e vapor d'água, no caso dos Hidrocarbonetos; Ácido Clorídrico e Fluorídrico, no caso do Freon 12.

São necessários vários queimadores, seu peso e volume são desprezíveis, sendo o seu aspecto o de “lâmpada” de pequenas dimensões. O consumo de energia, aparentemente é insignificante, uma vez que a zona afetada termicamente é muito próxima ao bulbo.

5.18.8.1.5 SUBSTITUIÇÃO DO AR AMBIENTE PELO AR DAS GARRAFAS DE O_2 ALTA PRESSÃO

É um processo mecânico de substituição de parcela do ar ambiente pelo das garrafas de O_2 de alta pressão. O ar retirado tem elevado nível de poluição, uma vez que ele é aspirado da praça de máquinas, em geral com o motor funcionando.

5.18.8.1.6 COMPARAÇÃO ENTRE O PROCESSO QUÍMICO E O MECÂNICO

A armazenagem das velas de oxigênio requer menor espaço e a quantidade total delas a ser levada a bordo pode, dentro de um certo limite, ser adequada às

necessidades táticas do submarino, ou seja, por viagem, peso consumível, enquanto que as garrafas fazem parte já do peso leve.

Por outro lado, as garrafas de oxigênio oferecem uma dosagem mais precisa e o fluxo de oxigênio pode ser interrompido a qualquer momento. Os cartuchos, entretanto, precisam ser completamente consumidos, uma vez iniciada a transformação, não estando excluída a possibilidade de reposição exagerada de oxigênio.

5.18.8.2 SISTEMA DE CONTROLE DA ATMOSFERA DO HÍBRIDO

No híbrido, o peso e o volume são limitados. Logo o processo mais adequado é uma combinação dos processos que minimizam o peso e o volume, assim: absorção de CO_2 por processo químico irreversível, gerador químico de O_2 e queimador de H_2 , CO e hidrocarbonetos.

O peso do sistema de queimadores, indispensável para evitar explosões de hidrogênio é desprezível. Por seu consumo de O_2 , é necessária uma reposição química via garrafas e uma absorção contínua de CO_2 , em razão do terrível efeito sobre o ser humano. Assim como já apresentado:

Tabela 46 – Resumo da seqüência de cálculos para o dimensionamento do sistema de controle de atmosfera

	O_2	CO_2
peso total [t]	0.408	1.401
volume total [m^3]	0.681	3.00

Onde o peso total é aproximadamente de 2 t e o volume interno de 3.6 m^3 . Isso força o sistema a ser espalhado pelo interior do volume resistente.

5.18.9 SISTEMA DE RESPIRAÇÃO EM EMERGÊNCIA (SWBS 512)

Opta-se pelo sistema, conhecido por BIBS, que permite que seja feita a renovação do ar a bordo, caso o mesmo venha a ser contaminado, durante um determinado período e é usado ainda na operação de salvamento da tripulação pelo torreão, para equalizar a pressão nesse, para cada grupo que abandona o navio.

O sistema BIBS é interligado ao sistema de ventilação e ar comprimido do navio, onde o ar, com uma composição de 35% de O_2 e 65% de N_2 , é armazenado em ampolas de 340 l, na pressão de 250 bar.

A distribuição desse ar é efetuada através de pianos de distribuição, depois de sofrer uma redução de pressão de 35.7 vezes, caindo para 7 bar. Os pianos alimentam as máscaras de emergência, distribuídas ao longo do híbrido, assim como ocorre nos

submarinos. Esse sistema prevê ainda uma tomada de recarga. Evidentemente para o híbrido o sistema está superdimensionado, mas são os efeitos da falta de miniaturização.

5.18.10 SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA (SWBS 300)

5.18.10.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA EM SUBMARINOS CONVENCIONAIS (SILVA ET AL., 1996B)

O sistema de energia elétrica em submarinos é projetado para fornecer energia tanto ao sistema de propulsão como também aos sistemas auxiliares e de combates que compõem o que se designa por carga Hotel. Os principais componentes do sistema elétrico de bordo são:

- (i) geradores principais;
- (ii) grupos de baterias;
- (iii) quadro elétrico de distribuição principal;
- (iv) equipamentos de distribuição;
- (v) equipamentos de proteção do sistema;
- (vi) sistemas de controle e monitoração;
- (vii) equipamentos de conversão.

A energia do submarino é provida:

- (i) quando na condição totalmente submersa, apenas pelos grupos de baterias;
- (ii) durante a operação de esnórquel, a energia é fornecida pelos diesel-geradores, que geram correntes alternadas (CA), que são retificadas para correntes contínuas;
- (iii) no porto, a energia elétrica é provida por tomadas de energia em terra.

Os quadros elétricos são comumente têm flexibilidade de alimentação por diesel-geradores, pela conexão de porto e pelas baterias.

5.18.10.1.1 CORRENTES, TENSÕES E FREQUÊNCIAS REQUERIDAS PELOS UTILIZADORES

A tensão variável de CC alimenta diretamente alguns utilizadores, via quadro elétrico de distribuição. No caso de utilizadores que necessitem de CC, em tensões específicas e não toleram variações de tensão, são utilizados conversores estáticos. No

caso de utilizadores que necessitem de CA, esta é obtida a partir de inversores estáticos ou motores-geradores.

O híbrido tende a simplificar o esquema convencional. A opção por motores PERMASIN de dipolos permanentes economiza espaços e permite a substituição dos inversores por alternadores. A tensão é a mesma dos submarinos convencionais.

Tabela 47 - Sistema de Distribuição de Energia do Híbrido

	Corr.	Alimentação
Sistema CC	CC	Inversores Estáticos
Sistema CA trifásico e monofásico 115V / 60Hz	CA	conversores DC-AC (inversores estáticos), ou alimentados por terra através de conexão do porto.
Sistema CA trifásico e monofásico 115V / 400Hz	CA	conversores DC-AC (inversores estáticos)
Sistema CA 220V / 60Hz e 220V / 400Hz	CA	transformadores a partir dos sistemas CA 115 V
Sistema CC 24V, 28V e 220V	CC	conversores estáticos, (tensão variável)

Procura-se minimizar a corrente contínua a bordo para economia de peso. A instalação elétrica do híbrido prevê dois quadros elétricos para alimentação dos equipamentos eletro-eletrônicos, todos os sistemas necessários ao armamento e um inversor de 36V-400V, em razão do motor elétrico ser CA.

5.18.10.2 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO (SWBS 321)

O sistema de distribuição é do tipo radial. Neste tipo, todas as cargas recebem alimentação através de cabos que convergem para os quadros elétricos de distribuição.

A escolha tem a ver com a pequena tripulação a bordo, minimizar as rotas de reparos e afastar os homens dos espaços destinados a equipamentos.

O dimensionamento do sistema de distribuição refere-se apenas ao seu peso. Partiu-se de uma formulação da USCG para navios patrulha, a seguir apresentada:

$$\text{Peso} = 0.01335 \cdot \text{DGkW} \times n / 3 + 0.109 \cdot L \quad (34)$$

onde L é o comprimento total, DGkW é a potência dos geradores em kW, n é o número de geradores.

A potência dissipada por efeito Joule na distribuição é dada por:

$$\text{Potência dissipada} = 3\% \times \text{DGkW} \times n \quad (35)$$

5.18.11 SISTEMA DE ÓLEO COMBUSTÍVEL (SWBS 260)

5.18.11.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA PARA SUBMARINOS CONVENCIONAIS (SILVA ET AL., 1996A)

O sistema de óleo combustível de submarinos é do tipo compensado. Neste sistema, à medida que o óleo for consumido, água salgada será injetada nos tanques, de forma a “compensar” a perda de peso e pressão.

São três os tipos de tanques de armazenamento:

- (i) tanques de combustível internos ao casco resistente;
- (ii) tanques de combustível externos ao casco resistente;
- (iii) tanques de combustível-compensação.

A água movimentada o óleo dos tanques de combustível externos ao casco resistente penetra diretamente neles, vinda do mar por pressão.

Para possibilitar reparos, inspeção e mesmo o esgoto em emergência, todos os tanques têm conexões de ar comprimido de baixa pressão. O ar comprimido é a única garantia de manter a estanqueidade dos tanques.

Dos tanques de armazenamento, o óleo é filtrado (filtros coalescer), e então bombeado aos tanques de serviço dos Diesel-Geradores (DGs).

5.18.12 SISTEMA DE RESFRIAMENTO DAS BATERIAS (SWBS 540)

O híbrido possui um sistema de resfriamento de baterias de dimensões e peso desprezíveis.

5.18.13 SISTEMA DE RESFRIAMENTO DOS MCAS (SWBS 260)

O híbrido possui um sistema de resfriamento de MCAs composto de trocadores de calor, seu volume e peso estão inseridos no interior do grupo 200, sem individualização.

5.18.14 SISTEMAS HIDRÁULICOS DE POTÊNCIA (SWBS 598)

O sistema hidráulico de potência percorre todo o Patrulha Submersível, distribuindo a potência hidráulica a seus diversos utilizadores:

- (i) hidroplanos e lemes;
- (ii) periscópios e mastros;
- (iii) máquina de suspender e cabrestante
- (iv) suspiro dos tanques de lastro;

- (v) válvulas de comunicação do casco resistente para o exterior;
- (vi) comportas e tubos de torpedos;

As linhas de suprimentos são mantidas em alta pressão por meio de acumuladores de pressão, os quais proporcionam a “capacitância” do sistema. Quando o acumulador começa a ser descarregado, as bombas os completam. Assim, as bombas não permanecem todo o tempo na linha, podendo o navio operar por um tempo considerável com a energia armazenada nos acumuladores.

A filosofia do emprego do anel que percorre todo o híbrido distribuindo a potência hidráulica, assim com a divisão do circuito de forma a aumentar a segurança.

5.18.15 SISTEMA DE LASTRO PRINCIPAL (SWBS 530)

O sistema de lastro principal é composto basicamente pelos tanques de lastro principais (TLP) que possibilitam o mergulho e emersão do híbrido e do submarino. Tais tanques devem ser em número maior de um para melhor controle de avarias.

O esgoto desses tanques, no híbrido, é efetuado por meio de ar de alta pressão, provenientes das ampolas de ar comprimido. O alagamento por pressão da água que ocupa os espaços vazios quando se abrem as válvulas de ar comprimido localizado no superior dos tanques.

5.18.16 SISTEMA DE COMPENSAÇÃO (SWBS 530)

O Patrulha Submersível adota o sistema de compensação que corrige a variação de peso ou de fluutuabilidade que naturalmente ocorre não só pelo consumo de itens como torpedos, provisões, etc., mas também pelas variações nas densidades da água e outros fluidos, notadamente em função da temperatura.

5.18.17 SISTEMA DE TRIMAGEM (SWBS 530)

O Patrulha Submersível adota o sistema de trimagem que consiste num circuito fechado de baixa pressão, interior ao casco de pressão. A variação de posição da água entre os tanques de vante e ré através de bombeamento de água faz o controle do trim do navio submerso.

Com o sistema interior ao casco resistente não é necessário utilizar-se ar comprimido e energia uma vez que a relação consumo de ar/efeito sobre o trim independe da profundidade.

5.18.18 SISTEMA DE CONTROLE DE AVARIAS (CAV - SWBS 664)

O sistema de controle de avarias tem a função de combater os incêndios e alagamentos, em escala limitada, que porventura venham a ocorrer a bordo.

O sistema compõe-se normalmente de (SILVA et al., 1996a):

- (i) Extintores portáteis de CO₂;
- (ii) Extintores portáteis de espuma;
- (iii) Extintores portáteis de pó químico;
- (iv) Extintores portáteis de água;
- (v) Armários de CAV;
- (vi) Conjuntos de garrafas de INERGEN (gás inerte para afogamento de incêndios na praça de máquinas).

A adoção do gás INERGEN representa solução melhor que de seus substitutos: o gás HALON, por conter CFC, está proibido; o gás carbônico (CO₂) tem grande toxicidade e por exigir concentrações elevadas para extinguir incêndios, constitui perigo à vida humana se escapar da praça de máquinas.

O gás INERGEN é composto por gases inertes, inalado, não apresenta danos à saúde. Em concentração de cerca de 30% em volume é capaz de extinguir incêndios.

O conjunto de garrafas de INERGEN fica situado fora das praças de máquinas e seu acionamento se dá normalmente por meio de cabines.

Por ocasião do incêndio (sinistro) os submarinos costumam acionar alarmes visuais e sonoros no compartimento protegido e no centro de controle de máquinas (CCM). Quando o incêndio se dá nas praças de máquinas, a ventilação é suprimida por meio de flaps.

O dimensionamento desse sistema é feito basicamente sobre o volume da praça de máquinas. Como o navio tem 240m³, aproximadamente, dos quais as máquinas ocupam aproximadamente 2/3, tem-se que ter 80 m³ de ar. Como a concentração deve ser de 30% então o volume deve ser de 24 m³.

Assim: $P_{ATM} \times$

$$V_{inergen} = P_{GARRAFA} \times V_{COMP}$$

Donde $24 \times 1/246 \sim 1/10$, donde basta uma garrafa de 0.340 l a 246 atm, ou seja, 0.5 t.

5.19 RESISTÊNCIA AO AVANÇO

5.19.1 RESISTÊNCIA AO AVANÇO NA SUPERFÍCIE (V2)

5.19.1.1 RESISTÊNCIA NA SUPERFÍCIE

A resistência ao avanço na superfície foi calculada pelo método estatístico de Holtrop (1984). Utilizou-se uma planilha validada para tal procedimento e a seguir se exibem seus resultados e os valores obtidos para a versão semiplaneio (V2, V2A).

Tabela 48 - Dados de Entrada do cálculo da resistência ao avanço, por Holtrop (1984)

Comp. Linha D'água: (m)	36.87
Boca Moldada: (m)	6.90
Calado Moldado na PV: (m)	2.00
Coef. Seção Mestra:	0.78
Coef. Linha D'água:	0.84
Cb	0.51
L/LCB	0.50
B/T	3.45
Ângulo de Entrada	29.00
Superfície molhada	254.00
Comp. perpendiculares: (m)	36.87
Calado Moldado na PR: (m)	2.00
Vol. Desloc. Moldado: (m3)	259
LCB rel. à PR: (m)	17.33
Área Transv. do Bulbo (m2):	0.00
Altura Centro Área Bulbo: (m)	0.00
Área Transom: (m2)	1.60
Área Apêndices: (m2)	1.00
Parâmetro Forma de Popa:	-10
Velocidade de serviço (nós)	22
Sm dada por Holtrop	268
Fn	0.60
Taylor	2.00
EkW	2590
Rt (kN)	265

A Tabela 49 representa valores capazes de gerarem a curva de resistência ao avanço da versão V2 (ainda não determinada se de hidrojetos ou não).

Tabela 49 - Resultados obtidos com o uso de Holtrop (1984)

V (nós)	Rt (kN)	EkW
4.00	2.7	5.2
5.00	4.1	10.3
6.00	5.6	17.5
7.00	7.6	27.8
8.00	10.2	42.2
9.00	13.7	63.9
10.00	18.7	96.8
11.00	25.6	145.2
12.00	31.9	197.8
13.00	39.6	264.7
14.00	53.1	383.2
15.00	71.4	549.5
18.00	121.2	1119.5
19.00	140.3	1368.6
20.00	160.7	1650.2
21.00	182.4	1966.1
22.00	210.1	2316.5
23.00	221.5	2618.3

A Figura 82 apresenta o gráfico de velocidade e resistência:

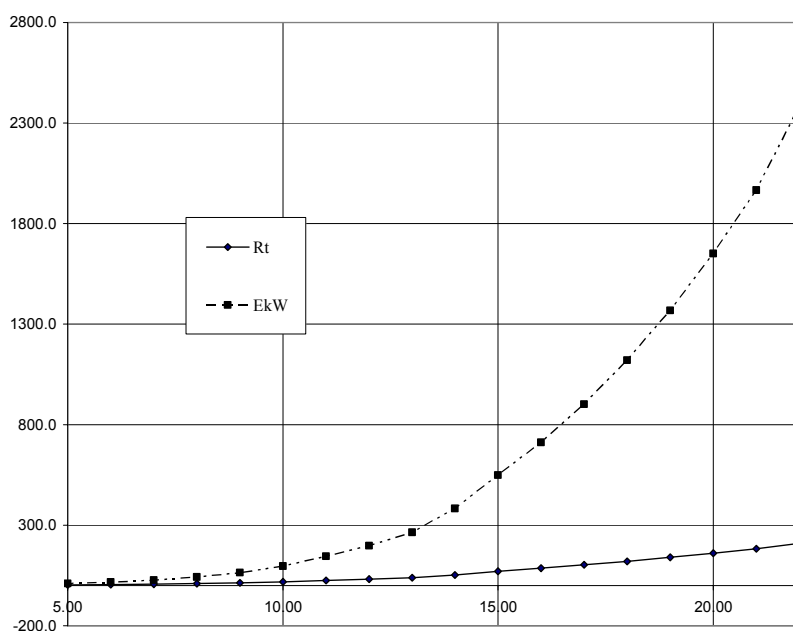


Figura 82 – EkW na superfície da versão V2.

5.19.2 RESISTÊNCIA AO AVANÇO NA CONDIÇÃO SUBMERSA

Essa estimativa obedece a duas hipóteses:

- (i) a hipótese de Froude: $C_t = C_R + C_f$
- (ii) o valor de C_R , para o híbrido, pode ser estimado pelos valores dos submarinos que conservassem formas semelhantes às de navios de superfície, como por exemplo, os submarinos de esquadra.

O valor numérico de C_f pode ser obtido da ITTC (1957):

$$C_f = 0.075/(\log(Re)-2)^2 \quad (36)$$

onde C_f é obtido por meio da ITTC (1957) e Re é o número de Reynolds adimensional.

Moura (1981) apresenta uma série de valores para C_R , com base em uma lista de coeficientes de resistência residual obtidos para muitos submarinos, da qual se obtém o mais adequado ao híbrido, estimado em 0.00024, valor muito superior aos valores previstos para coeficientes de resistência residual pela série de Gertler (1950).

A potência efetiva obedece à seguinte regra:

$$EkW = \frac{1}{2} C_t \rho S_m V^3 \quad (37)$$

onde ρ é a massa específica da água em kg/m^3 , V é a velocidade em m/s , e S_m é a superfície molhada em m^2 e C_t é o coeficiente de resistência total.

A Vela, as superfícies de controle e demais apêndices acrescem à resistência ao avanço submersa, sua própria resistência ao avanço, composta pelas mesmas parcelas que a resistência do casco nu e uma outra parcela decorrente da formação de turbilhões que interferem no fluxo do escoamento em torno do casco, como ilustrado na Figura 83, cujo efeito é de difícil quantificação.

Os projetistas de submarinos resolvem o problema de apêndices de várias formas. Adota-se aqui a mais simples que é adicionar-se à área do casco nu a soma da área dos apêndices.

A área molhada correspondente ao casco nu é de 562 m^2 . As superfícies de controle, em número de 6 (3 pares) acrescem 6% em área molhada da superfície do navio. A vela conta com 20 m^2 de área, o que representa 3.5% nessa área. Assim acresce-se uma área de 10% sobre o valor de 562 m^2 , perfazendo 618 m^2 .

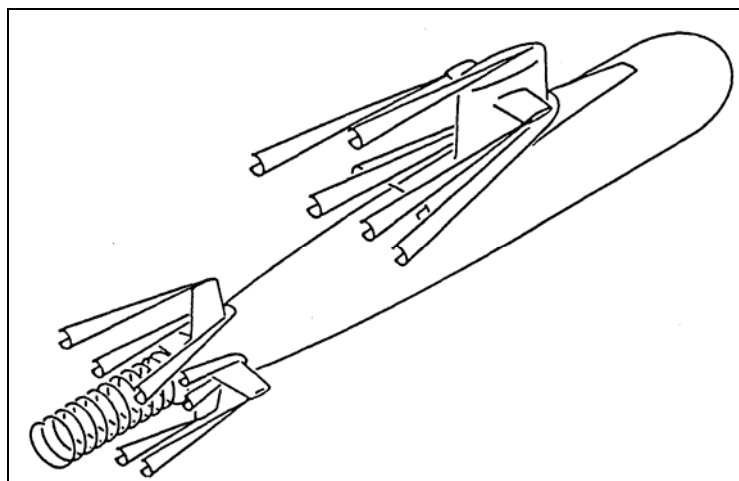


Figura 83 – Vórtices gerados por um submarino (CREPEL, 1989)

A Tabela 50 apresenta o resultado da resistência e potência submersa para a versão V2 (idêntica a versão V2A). A Figura 84 apresenta a curva correspondente.

Tabela 50 - EkW da versão V2 e V2A

V (nós)	L (m)	Sm (m²)	cf	cr	ct	Rt (kN)	EkW (kW)
1	36.9	618.2	0.00181	0.00024	0.00205	0.2	0
2	36.9	618.2	0.00199	0.00024	0.00223	0.7	1
3	36.9	618.2	0.00211	0.00024	0.00235	1.8	3
4	36.9	618.2	0.00221	0.00024	0.00245	3.3	7
5	36.9	618.2	0.00228	0.00024	0.00252	5.3	14
6	36.9	618.2	0.00235	0.00024	0.00259	7.8	24
7	36.9	618.2	0.00240	0.00024	0.00264	10.9	39
8	36.9	618.2	0.00245	0.00024	0.00269	14.4	59
9	36.9	618.2	0.00250	0.00024	0.00274	18.6	86
10	36.9	618.2	0.00254	0.00024	0.00278	23.3	120
11	36.9	618.2	0.00258	0.00024	0.00282	28.6	162
12	36.9	618.2	0.00262	0.00024	0.00286	34.5	213
13	36.9	618.2	0.00265	0.00024	0.00289	41.0	274
14	36.9	618.2	0.00268	0.00024	0.00292	48.0	346
15	36.9	618.2	0.00271	0.00024	0.00295	55.7	430
16	36.9	618.2	0.00274	0.00024	0.00298	64.0	527
17	36.9	618.2	0.00277	0.00024	0.00301	73.0	638
18	36.9	618.2	0.00280	0.00024	0.00304	82.5	764

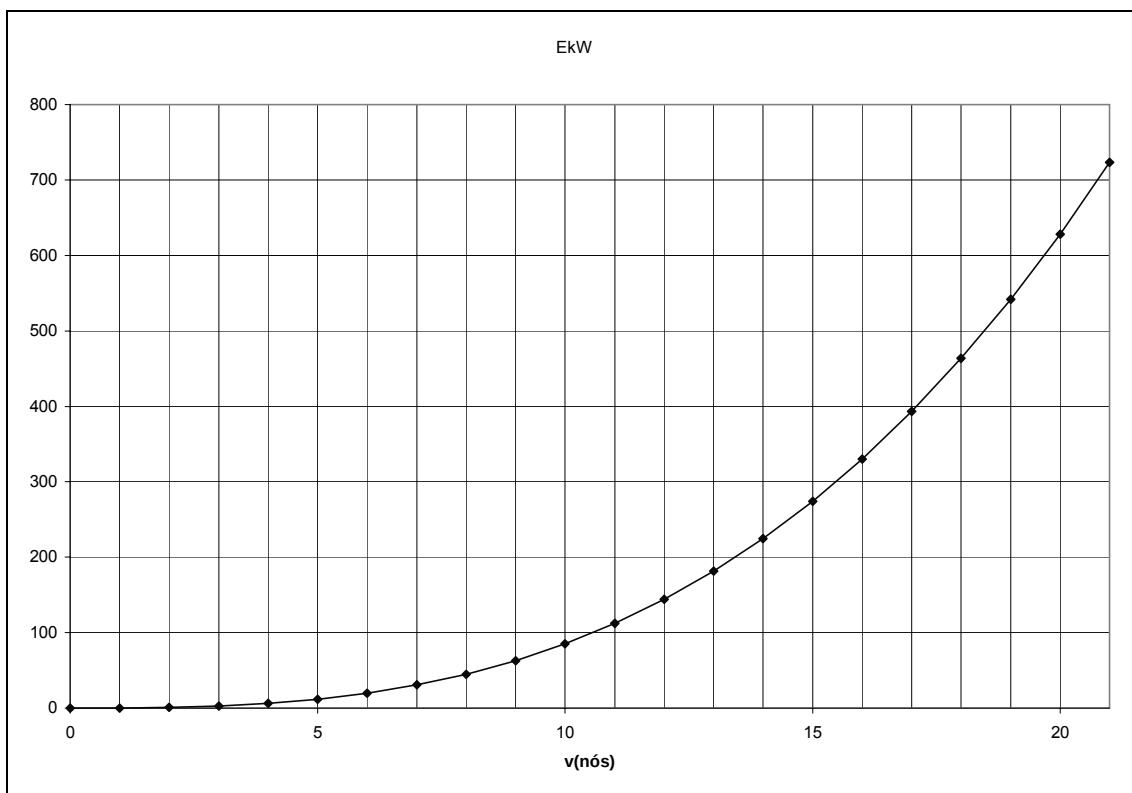


Figura 84- EkW submerso da versão V2 e V2A

5.20 PROPULSÃO

5.20.1 PROPULSOR (SWBS 245)

A potência instalada em navios e submarinos está em seu interior, seca. O meio de transmissão dessa potência é hodiernamente de duas naturezas: princípio da variação de quantidade de movimento (jatos de água), e o da teoria da circulação (hélices).

O melhor desempenho para a transmissão de forma genérica tem definições diferentes: para submarinos, um nível de ruído baixo associado a uma boa eficiência mecânica; para navios, uma alta eficiência mecânica. Entende-se por eficiência mecânica a relação entre o *input* e o *output* em termos de energia para o processo.

Os submarinos apresentam hélices como um grande número de lâminas ou um alto ângulo de *skew*, que embora proporcionem uma pequena redução na eficiência, melhoram o desempenho da embarcação através de um menor nível de vibrações e de ruídos emitidos.

Os hélices de submarinos apresentam número ímpar de pás, pois isso minimiza problemas de vibração, fazendo com que o empuxo desenvolvido seja mais bem distribuído, e com isso as flutuações de carregamento sejam menos intensas, resultando em melhores características de baixo ruído e vibração. A maioria dos submarinos modernos têm cinco ou sete pás.

Entretanto, nem todos os submarinos têm hélices. Na verdade, há submarinos com hidrojetos. O híbrido V2A adota essa concepção por duas razões:

- (i) a altura do eixo propulsor não permite a imersão necessária do hélice;
- (ii) o híbrido pretende passar a maior parte do tempo pousado no fundo, de forma que a solução de hidrojato é a mais segura.

A opção pelo hidrojato, entretanto, resulta em uma faixa estreita de operação para cada velocidade, o que faz com se tenham, no híbrido, diferentes hidrojetos, para cada uma das velocidades de projeto.

5.20.2 HIDROJATO (SWBS 245)

O sistema de hidrojato começou a ganhar aceitação e nos últimos anos quando houve um aumento muito grande tanto no número de embarcações quanto no número de seus fabricantes.

5.20.2.1 DESCRIÇÃO

5.20.2.1.1 VANTAGENS (TAKIMOTO E OLIVEIRA, 1999):

- (i) Redução de calado;
- (ii) Eliminação de apêndices;
- (iii) Ausência de resistência de arrasto de apêndices;
- (iv) Manobrabilidade aumentada;
- (v) Torque praticamente constante para toda a faixa de velocidade do navio para uma determinada demanda de potência;
- (vi) Permite que seja aplicada potência máxima a baixas velocidades do navio;
- (vii) Distância de parada melhorada, principalmente em velocidade;
- (viii) Redução de potência para altas velocidades;
- (ix) Redução de consumo para altas velocidades de cruzeiro;
- (x) Vibração reduzida;
- (xi) Redução do nível de ruído interno;
- (xii) Grande redução de ruído debaixo d'água.

5.20.2.2 DESVANTAGENS (TAKIMOTO E OLIVEIRA, 1999)

Consideram-se desvantagens da utilização de hidrojetos:

- (i) Pequeno aumento de consumo de combustível em baixas velocidades em relação a sistemas de propulsão a hélice;
- (ii) Possibilidade de ter lixo obstruindo a entrada de água na aspiração da bomba;
- (iii) Possibilidade de ingestão de ar em determinadas condições de mar.

No passado a eficiência dos propulsores era muito maior. No quadro atual, há pouca diferença na eficiência entre propulsores a hélice e jato d'água em velocidades abaixo de 20 nós, acima deste valor, a eficiência deste último é maior.

A desvantagem em se aspirar folhagens ou lixo pode ser contornada colocando uma caixa reversora após o motor que bombearia a água em sentido inverso e fazendo com que a sujeira se desprenda da grade protetora (TAKIMOTO e OLIVEIRA., 1999).

5.20.2.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O hidrojato é basicamente uma bomba que impulsiona um jato de água para ré e, através do princípio de ação, fornece o empuxo necessário para a movimentação do

navio. Funciona para uma embarcação, na água, assim como uma turbina a gás para um avião, no ar.

Compõem-se fundamentalmente de:

- (i) duto de entrada;
- (ii) a bomba; e
- (iii) o cone de saída.

Os limites para o dimensionamento das unidades são os seguintes:

- (i) potência máxima;
- (ii) potência máxima sem cavitare em baixa velocidade;
- (iii) dimensões de modo a conseguir ser instaladas na popa “*Transom*”.

Pode-se pensar no hidrojato de forma simplificada em função da quantidade de movimento:

$$T_p = (V_2 - V_1) \, dm/dt \quad (38)$$

onde T_p é o empuxo, dm/dt , a vazão mássica, V_1 , a velocidade de entrada (velocidade do navio) e V_2 , a velocidade de saída da água.

O aumento da unidade propulsora (ou seja, uma seção transversal maior) acarreta aumento da eficiência do jato d’água, pois a relação de empuxo necessária para uma certa velocidade é suprida por um maior volume de água, que é um análogo ao que ocorre com o aumento de diâmetro do propulsor.

Outra forma de se obter o empuxo necessário é aumentar a relação de velocidade de jato/velocidade do navio, entretanto, isso ocorre com uma diminuição da eficiência.

Pode-se perceber uma solução de compromisso para as dimensões do hidrojato de forma que seja grande o suficiente para que não cavite em baixas velocidades e que não seja muito grande e pesado além do necessário. Quanto maior o diâmetro da face de entrada da bomba, menor a cavitação.

O hidrojato é dimensionado para uma potência do motor com baixos índices de cavitação, longe dos níveis de carbonização. O arranjo de mais de uma unidade aumenta a flexibilidade do sistema.

Para o híbrido, as unidades propulsoras não ficam abaixo da água, não acrescentando resistência de apêndices. Isso acarreta que a resistência é independente do número de unidades (o que não seria verdade se influíssem na resistência de apêndices).

Para efeito de dimensionamento, portanto, a resistência total do navio pode ser dividida pelo número de hidrojetos em linha para cada velocidade, na superfície.

Quando submerso, o hidrojato funciona melhor com menor nível de ruído, pois a grandes profundidades a pressão atua contra o fenômeno de cavitação.

5.20.2.4 DIMENSIONAMENTO

Como o híbrido apresenta o requisito de grandes potências a velocidades relativamente baixas velocidades, na superfície, e mais, como sua potência é gerada por uma turbina a alta rotação, faz-se mister utilizar-se de um hidrojato de grandes dimensões para evitar a cavitação.

O hidrojato perde em eficiência com relação a um hélice de grande diâmetro, mas ganha sobremaneira em peso e altura (pois elimina a engrenagem redutora).

Para a seleção do hidrojato basta plotar a curva de resistência total por velocidade ($R_T \times V$) em nós e superpô-la aos próprios gráficos oferecidos pelos fabricantes de hidrojetos.

Deve-se encontrar, um hidrojato, ou um conjunto de hidrojetos que envolvam todos os pontos da curva de resistência ao avanço no interior da região livre de cavitação.

Não se encontra um único hidrojato comercial capaz de satisfazer ao híbrido, em sua máxima velocidade na superfície. Com o uso de Allison (1993), percebe-se a necessidade de uma abertura de 1.80 m no casco resistente para entrada da água necessária a propulsão, o que é impossível. Assim opta-se por dividir o número de hidrojetos em pelo menos dois e lançá-los para fora do casco resistente por muitas razões:

- (i) as paredes dos dutos não mais necessitam ser resistentes a pressão;
- (ii) economizam comprimento do casco resistente que de outra forma seria utilizado por engrenagens redutoras;
- (iii) a utilização de diferentes hidrojetos permite aumentar a flexibilidade do navio para operar em velocidades diferentes. Essa utilização tem o inconveniente de ser mais pesada que aquela de apenas um hidrojato, mas é a melhor opção.

Divide-se, assim, o número de hidrojetos para evitar a cavitação e reduzir o comprimento dos dutos de admissão de modo a garantir uma melhor estanqueidade do casco.

Opta-se, também, pela escolha de hidrojetos comerciais cujos pesos e potência estão disponíveis.

Lembrando-se que se plotam pontos da curva de resistência por velocidade ($R_T \times V$), para o navio quando submerso tem-se o ponto (3 kN, 3 nós) (velocidade mínima mantida) da Figura 84 e, na superfície o ponto (40 kN, 13 nós) da Figura 82 (velocidade de patrulha) que definem o hidrojato (63 SII) da KAMEWA, acoplado ao motor elétrico, quando em baixas velocidades.

Para altas velocidades, em torno de 22 nós (velocidade de interceptação), na superfície utiliza-se, então dois hidrojetos (90 SII), de forma a satisfazer o ponto (222 kN, 23 nós) da Figura 82.

Apenas incidentalmente, o hidrojato ótimo para a velocidade mínima submersa é idêntico ao da velocidade de operação na superfície o que permite minimizar o número de hidrojetos e o peso do conjunto.

O hidrojato da velocidade mínima submersa encontra-se acoplado ao motor elétrico na forma da Figura 85 e Figura 86 em que se apresenta o arranjo de bateria, inclusive. A circunferência superior representa o motor elétrico, os retângulos, as baterias e as pequenas circunferências os eixos. A letra L significa lead, ou lastro fixo. A circunferência menor e concêntrica significa a diminuição do diâmetro do casco resistente em virtude da esfericidade do parte de ré desse casco.

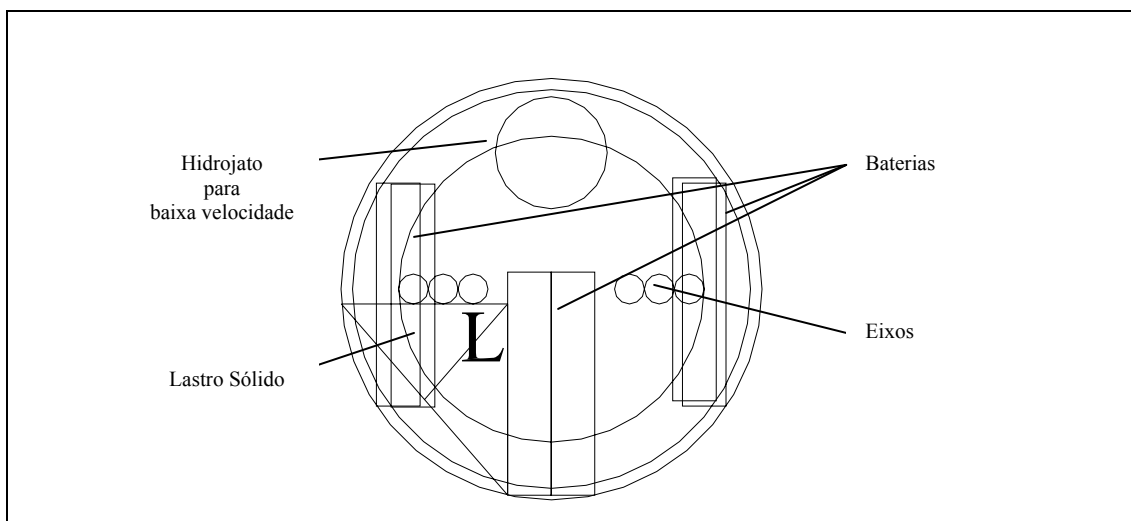


Figura 85 - Arranjo de baterias da versão V2 com hidrojato.

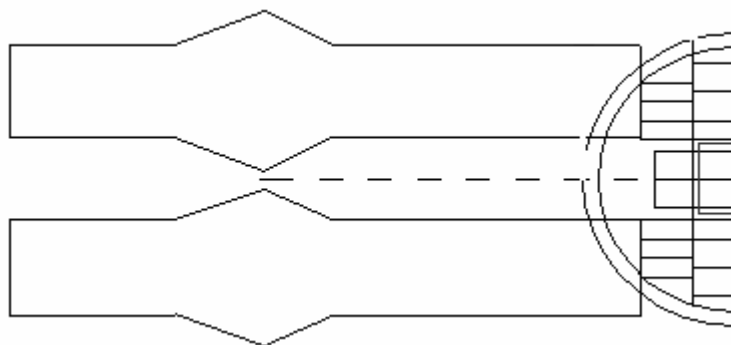


Figura 86 - Arranjo dos hidrojetos 90 SII no interior do casco hidrodinâmico

O peso dos hidrojetos está na Tabela 86 e o rendimento dessa instalação é de aproximadamente 57%, para o hidrojetado 63 SII e 40% no 90SII.

5.20.2.5 CARACTERÍSTICAS DOS HIDROJETOS

A - limite de cavitação, B - margem de cavitação suficiente, C - indica que menor hidrojetado pode satisfazer ao problema.

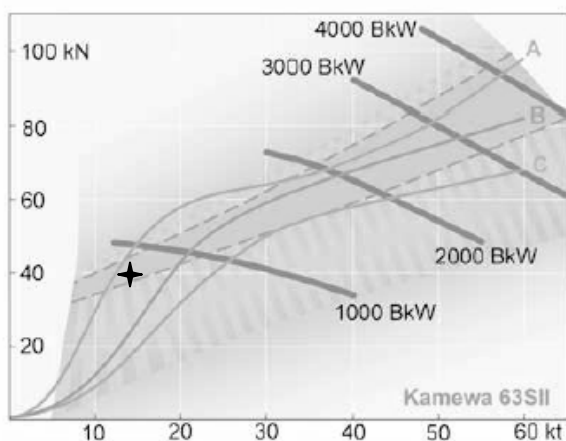


Figura 87 - Fact sheet: Kamewa™ Waterjets, S-series.

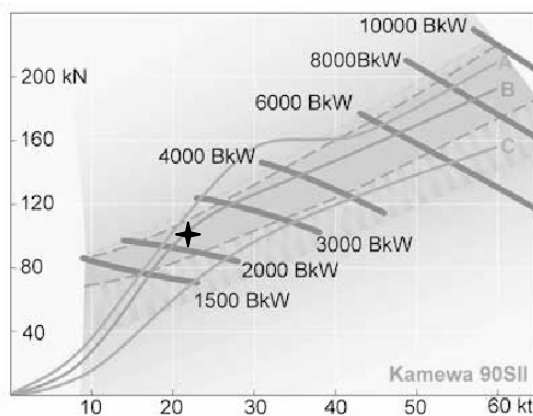


Figura 88 - Fact sheet: Kamewa™ Waterjets, S-series.

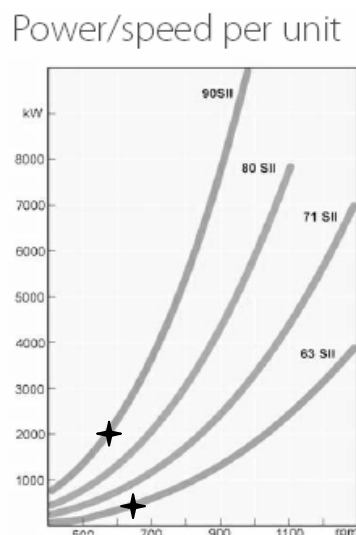


Figura 89 - Fact sheet: Kamewa™ Waterjets, S-series.

5.20.3 LINHA DE EIXO (SWBS 243)

O cálculo do eixo pode tomar duas abordagens diferentes: cálculo racional ou por meio de normas.

O cálculo racional costuma ser empregado para obtenção de estruturas mais esbeltas. Mesmo nesse caso, exige-se o arbitramento de um coeficiente de segurança, um parâmetro inicial, que por si só, é um elemento subjetivo.

A norma, por outro lado, estima parâmetros em acordo com valores empírico-estatísticos, advindos da prática do manuseio das máquinas navais bem sucedidas, em outras palavras, a norma é uma espécie de conselheiro experiente, mostrando o que fazer para se evitar falhas.

É esse o método utilizado para estimar-se o eixo do híbrido.

5.20.3.1 ARRANJO PRELIMINAR DA LINHA DE EIXO

A linha de eixo típica compõe-se de:

- (i) Acoplamento elástico;
- (ii) Mancal de escora;
- (iii) Sistema de selagem e vedação;
- (iv) Eixo intermediário; e
- (v) Eixo propulsor/hidrojato.

Uma chávina trava o hélice ao eixo, enquanto que aperto do hélice ao eixo propulsor é realizado por uma porca, exceto no caso do hidrojato, quando não há esse segmento de eixo.

A função do mancal de escora é a de evitar a transmissão ao motor de esforços normais atuantes no eixo. O acoplamento elástico serve para compensar desalinhamentos verticais ou horizontais, entre motores elétricos e eixo propulsor.

5.20.3.2 DIMENSIONAMENTO

No projeto da linha de eixo do híbrido prefere-se empregar o aço da classe 3 da MIL-S- 23284. Esse material apresenta *tensões limite de*: 517 N/mm² para tensão de ruptura e 310 N/mm² para tensão de escoamento.

O Lloyd's Register (1985) em sua página 1, capítulo 6, parte 5, recomenda a utilização da formulação (39):

$$d = FK\sqrt[3]{\frac{P}{R}(c_1/(\sigma_n + c_2))} \quad (39)$$

onde P é a potência de regime em kW , R é a rotação em *rpm* para esta potência na velocidade de regime, c_1 é uma constante com o valor de 560, c_2 é uma constante com o valor de 160, F é um fator igual a 100 para eixo propulsor e 95 para eixo de escora, K é um fator de projeto igual a 1.1 para navios patrulha e σ_n é a tensão limite de escoamento em N/mm²

O eixo do híbrido é projetado considerando-se a condição de velocidade máxima mantida, normalmente utilizada pelas Sociedades Classificadoras.

O maior interesse nesse dimensionamento é encontrar-se um valor para o peso do sistema e garantir que é possível construir um eixo para tão elevada potência no limite do volume interno.

Tabela 51 - Obtenção do diâmetro do eixo do navio

d (mm)	250
P	6000
R	1300
c1	560
c2	160
σ_n	310

Com a determinação do diâmetro pode-se calcular um peso por metro, no caso igual a:

$$\frac{\text{Peso}}{\text{metro}} = \frac{\pi D_{\text{eixo}}^2}{4} \rho_{\text{aço}} = 0.382t / m$$

Com isso, acrescentou-se o peso total de 3,16 t à composição do peso leve da versão V2A .

5.20.4 VELOCIDADES (V2A)

5.20.4.1 ESTIMATIVA DE POTÊNCIA

Toda a potência fornecida, quando profundamente submerso, provém das baterias. As baterias devem ser projetadas para que atendam a seguinte demanda de potência:

$$W_{DB} = W_{HOTEL} + W_{PERDAS} + BkW \quad (40)$$

onde W_{DB} é potência fornecida pela bateria, BkW é a potência necessária à propulsão, W_{HOTEL} é a potência necessária à carga hotel (auxiliares) e W_{PERDAS} é a potência dissipada na rede.

Assim, para determinar a velocidade que pode alcançar a embarcação deve-se definir o número de elementos que se leva.

5.20.4.2 POTÊNCIA NECESSÁRIA À CARGA HOTEL (AUXILIARES, W_{HOTEL})

Esse dimensionamento pode ser indiretamente determinado pela potência instalada em navios patrulhas semelhantes.

No híbrido, como existe uma forte concentração de áreas, o que reduz sobremaneira o consumo, a potência poderia ser reduzida na razão de compressão dessas áreas. Assim, estima-se para o híbrido uma carga de 70kW.

5.20.4.3 POTÊNCIA DISSIPADA NA REDE (W_{PERDAS})

A potência dissipada na rede foi estimada em 3% do somatório das demais parcelas componentes da potência fornecida pela bateria (CARVALHO Jr. et al., 1998b).

5.20.4.4 POTÊNCIA NECESSÁRIA À PROPULSÃO (BkW , V2)

A potência necessária à propulsão pode ser expressa por:

$$BkW = \frac{EkW}{\eta_p} \quad (41)$$

onde EkW é a potência requerida pelo casco e η_p é o coeficiente propulsivo

O BkW é função da velocidade que é proporcional a sua área molhada, quando submerso a maior parcela de resistência é devida ao atrito, que se relaciona ao número de Reynolds.

O coeficiente propulsivo para os hélices e hidrojetos pode ser estimado diretamente de gráficos do fabricante e depende de fatores que envolvem velocidade, potência e rotação.

Utilizando-se dos gráfico da Figura 87 pode-se estimá-lo da seguinte forma. O ponto $R_T = 45 \text{ kN}$, $V = 20$ nós corresponde a uma potência de 1000 kW. O produto $V \cdot R_t = 1751$, o que dá um coeficiente propulsivo de 0.57 (considerado constante para os pontos de menor EkW).

Analogamente com os pontos $R_t = 90 \text{ kN}$, $V = 20$ nós da Figura 88 obtém-se 931 kW, enquanto que a própria figura solicita uma potência mínima de 2000 kW, o que dá um coeficiente propulsivo de 0.46, aproximadamente.

Desses valores pode-se levantar uma curva a favor da segurança para o cálculo do BkW.

Tabela 52 - BkWsup, BkW na superfície e BkWsubmerso

V	BkWsup	BkWsub
4.00	10	14
5.00	20	27
6.00	34	48
7.00	54	78
8.00	82	119
9.00	125	172
10.00	189	240
11.00	284	324
12.00	387	426
13.00	519	548
14.00	751	692
15.00	1077	860
16.00	1395	1054
17.00	1767	1276
18.00	2195	1528
19.00	2683	1812
20.00	3235	2131
21.00	3855	2485
22.00	4541	2878
23.00	5133	3308

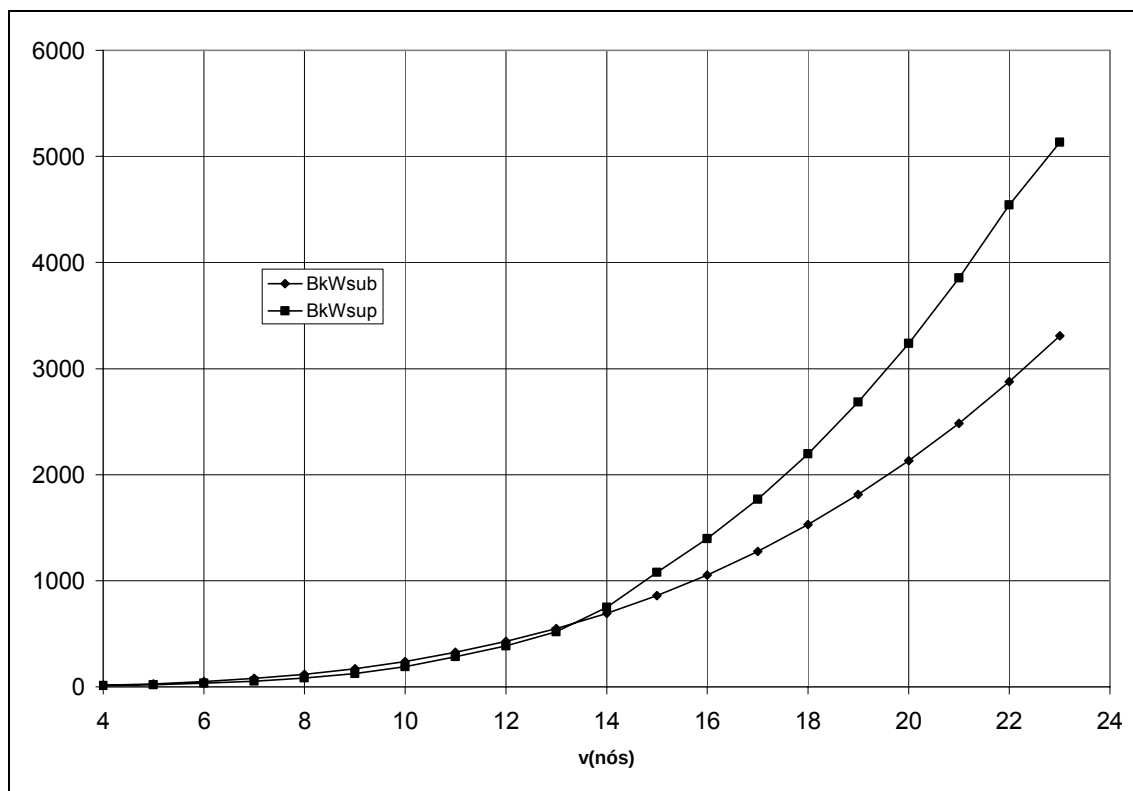


Figura 90 - Curva de BkW, na superfície e submerso

5.20.4.5 NÚMERO DE ELEMENTOS E VELOCIDADE MÁXIMA SUBMERSO APENAS COM BATERIAS

Sendo impossível carregar o mesmo número de elementos de bateria de qualquer submarino convencional em operação, em razão do elevado peso desses elementos, procura-se saber qual o número de elementos de bateria que deve ser carregado pelo híbrido de forma a atender sua missão.

Sabe-se que quanto mais elementos de bateria carregar, maior a potência carregada. O ônus de se carregar muitos elementos, entretanto, é alto, tanto em peso como em volume. A Tabela 53 apresenta o peso do elemento de bateria escolhido

Tabela 53 –Elemento comercial S 16 UR 14 (Baterias para Propulsão de Submarinos, 2000)

Elemento	S 16 UR 14
Peso [t]	0.563
Comprimento [m]	0.452
Largura [m]	0.292
Altura (até o pólo)[m]	1491
Capacidade Nominal[Ah] em regime de 10h	10900
Potência em regime constante (1.25h) [W/elemento]	10200

Procura-se, portanto, um ponto de máximo em que peso e volume satisfaçam a potência necessária. No momento, porém, não se sabe exatamente qual o peso e o

volume disponível para essas baterias (arbitrado, inicialmente por questões de arranjo em 18 elementos).

O número de elementos de bateria, entretanto, está relacionado com a velocidade submersa numa curva do tipo apresentado na Figura 91. A montagem do gráfico apresentada nesta figura é possível porque a potência se relaciona proporcionalmente com o número de elementos, enquanto que de forma cúbica com a velocidade. Isso significa que para construir a curva da Figura 91, basta um pequeno ajuste de escala no eixo da velocidade, V , no gráfico $V \times BkW$ (gráfico inverso do $BkW \times V$, comumente utilizado).

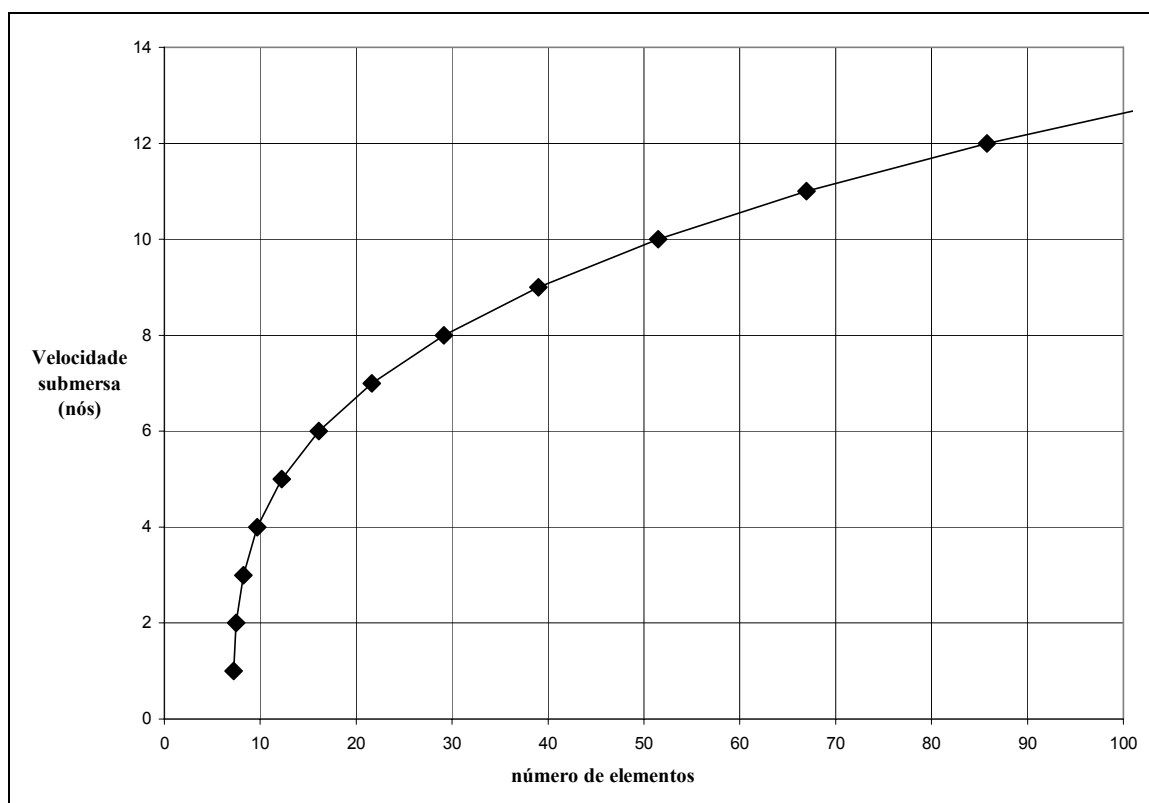


Figura 91 – velocidade em nós do navio em função do número de elementos de bateria

Da Figura 91, pode-se perceber que até 4 nós é necessário acrescentar-se menos de 5 elementos para 2 nós de aumento em velocidade. De 10 a 12 nós, entretanto, são necessários praticamente 40 elementos.

Esse comportamento permite reescrever o problema da seguinte forma: em que ponto o incremento em velocidade passa a não compensar o incremento no número de elementos de bateria. Numa outra forma, o problema pode ser escrito: pergunta-se saber se compensa reservar espaço ou peso a bordo para carregar mais elementos de bateria.

Considerando as velocidades são sensíveis a cada nó inteiro e que os elementos de baterias são também quantizados, trata-se de um problema discreto.

É possível, entretanto, definir-se uma relação capaz de determinar quando se deve parar de acrescentar elementos de bateria. Essa relação mede o incremento em velocidade, igual a 1 nó em relação ao incremento em número de elementos, chamado de ϵ , definido de acordo com a equação (42).

$$\epsilon = (n^{\circ} \text{elementos}_{V+1 \text{ nó}} - n^{\circ} \text{elementos}_V) \quad (42)$$

onde V é a velocidade considerada.

Chamando-se o número de elementos de baterias de χ , e utilizando-se dos valores das potências definidas nos itens precedentes, pode-se chegar ao número de elementos que deve ser carregado pelo híbrido, como apresentado na Tabela 54.

Tabela 54 - Número de elementos de baterias por velocidade submersa

V (nós)	WBD (kW)	Capacidade kAh/h	χ	ϵ
1	72	10	7	1
2	75	10	8	0
3	83	10	8	2
4	100	10	10	3
5	128	10	13	4
6	171	10	17	6
7	233	10	23	9
8	317	10	32	11
9	427	10	43	14
10	566	10	57	17
11	739	10	74	21
12	949	10	95	25
13	1201	10	120	30
14	1497	10	150	34
15	1843	10	184	40
16	2243	10	224	46
17	2700	10	270	

Onde χ , = WBD/(10 kAh/h), denominador obtido da Tabela 53

A Tabela 54 permite observar que para se atingir a velocidade mínima, necessita-se de 10 elementos. Para aumentar-se a velocidade para 6 nós, são necessários mais 7 elementos. O próximo nó necessita de mais 7 elementos, o que permite perceber uma clara queda no ganho em velocidade. Dessa forma, o melhor ponto parece ser estabilizar o número de elementos em 17. Escolhe-se o número 18, por ser o número par

mais próximo que permite, inclusive, equilibrar o peso em ambos os bordos da embarcação.

5.20.4.6 RAI0 DE AÇÃO E AUTONOMIA COM BATERIAS

As baterias apresentam variações na potência disponível em função do tempo de descarga. A Tabela 53 mostra dois patamares de descarga , respectivamente 10h e 1.25h. Para o raio de ação toma-se o valor para descarga em 10 h. Assim pode-se afirmar que a capacidade da bateria praticamente dobra.

Como o interesse é calcular o máximo raio de ação possível e a potência é proporcional ao cubo da velocidade, utilizar-se-á a menor velocidade possível.

As correntes marinhas costumam não ultrapassar 2 nós. Assim uma velocidade de 3 nós é um valor que assegura o governo da embarcação com relação ao fundo.

Tabela 55 – Raio de Ação e autonomia com baterias

V (nós)	WBD	kAh/ χ /h	χ	Horas de descarga	Capacidade (kWh)	Horas de consumo	Aut (dias)	RA (mn)
3	83	20	18	10	3600	43	1.8	130
4	100	20	18	10	3600	36	1.5	144

Onde aut é a autonomia em dias e RA, o raio de ação em milhas náuticas, χ número de elementos de baterias.

5.20.4.7 RECARGA DE BATERIAS

Assim como em seu descarregamento, em sua carga o tempo do processo afeta o resultado final. O carregamento de baterias pode ser feito de forma rápida ou lenta. O limite da carga rápida é a gaseificação. A gaseificação pode provocar erosão das placas e o desprendimento de gases como o hidrogênio aumentando o perigo de explosão.

O híbrido é dimensionado de forma a evitar erosão e gaseificação.

A equação (43) apresenta o equacionamento do problema (SILVA et al., 1996a):

$$t_s = f(W_{DG}, W_{DB}) \quad (43)$$

onde W_{DG} é potência fornecida pelos diesel-geradores, t_s é o tempo de esnórquel, W_{DB} é a potência liberada pela bateria.

5.20.4.8 TAXA DE INDISCRICÃO

A taxa de indiscrição é a relação entre o tempo que o submarino esnorqueia sobre o tempo total em imersão, pode ser expressa por (SILVA et al., 1996a):

$$CI = \frac{t_s}{t_s + t_i} \times 100 \quad (44)$$

Onde CI é o coeficiente ou taxa de indiscrição, t_s : tempo de esnórquel, t_i : tempo imerso.

5.20.4.9 VELOCIDADE DE ESNÓRQUEL

A operação de esnórquel consiste no funcionamento submerso do Diesel Gerador. Para tanto, admite-se ar por um tubo. O ar de admissão, entretanto, é restrito em razão do relativo pequeno diâmetro do mastro do esnórquel e sua tubulação, o que impede a utilização de turbinas nessa operação.

Tabela 56 – Velocidade de esnórquel

V (nós)	W _{DB} (kW)	WDG (kW)	t _s (h)	CI
11	739	724	9.0	17%

Onde $t_i = 43$ h (a 3 nós).

Para evitar o alagamento do esnórquel, em submarinos, a admissão de ar fecha automaticamente se encoberta pela água. Nesse caso, o ar contido no casco atua como um amortecedor para compensar as flutuações de pressão. Caso haja uma depressão excessiva, o motor é cortado automaticamente para evitar perigo à tripulação.

Para evitar detecção, a descarga se faz abaixo da linha d'água através de um silenciador e um duto de exaustão, ambos resfriados à água. A pressão dos gases de exaustão previne o ingresso de água do mar. O diesel é acionado com os flaps de exaustão fechados. (SILVA et al., 1996a)

A potência disponível máxima a bordo corresponde ao produto da potência dos quatro diesel geradores, 744 kW, o que permite concluir que a maior velocidade em esnórquel corresponde à potência de 739 kW e a 11 nós, com um coeficiente de indiscrição de 17%.

5.20.5 RESUMO DAS VELOCIDADES DO HÍBRIDO V2A

Esse tópico apresenta as velocidades calculadas sob a hipótese de deslocamento moldado de 254 t, obtido preliminarmente:

- (i) 22 nós, na superfície, máxima;
- (ii) 12 nós, máxima, na superfície, com a propulsão elétrica;
- (iii) 10 nós, patrulha econômica;
- (iv) 11 nós com esnórquel;
- (v) 6 máxima submersa (apenas com baterias);
- (vi) 3 mínima submerso;

Dessas velocidades todas são atingidas com a propulsão elétrica com hidrojato (63SII). Apenas a velocidade de 22 nós demanda os hidrojatos e as turbinas.

5.21 ESTRUTURAS (V2A)

O cálculo estrutural aqui desenvolvido tem a finalidade de descobrir se o peso estrutural é compatível com os requisitos de potência e velocidade, pois nenhuma das formulações empíricas hoje existentes permite obter boa aproximação, nesse navio que difere sensivelmente dos submarinos atuais.

Dimensiona-se a estrutura segundo as normas BV 104 e ABS (condição submersa), alertando sempre que haja desvio dessas normas em razão das particularidades do navio. Busca-se obter uma equação do tipo:

$$\text{Peso}_{\text{Estrutura Calculada}} \geq \text{Peso}_{\text{Estrutura Definitiva}} \quad (45)$$

Para facilitar o entendimento do que se segue, é apresentado o fluxograma da Figura 93. Note-se que o procedimento de dimensionamento do casco hidrodinâmico é o mesmo para as versões com casco resistente cilíndrico ou aquelas que não o possuam.

O cálculo estrutural do híbrido difere daquele de outros submarinos ou submersíveis (mesmo os mais antigos), pois há grande reserva de flutuação, e uma relação B/T~3. A Figura 92 tenta mostrar essa diferença comparando os muitos tipos de submarinos e o híbrido.

Nas versões com casco resistente cilíndrico interno, sua estrutura é dimensionada como aquela de um navio que carrega um grande peso (o casco cilíndrico). Na versão sem casco resistente cilíndrico, o que se modificam são as pressões de carregamento atuantes no casco hidrodinâmico, para levar em conta a profundidade. Tanto as versões com casco cilíndrico, como aquelas sem esse casco, são dimensionadas a favor da segurança, porque não consideram a pressão do interior dos compartimentos que deve ser pelo menos igual à pressão do óleo contido no tanque (levada em conta em projetos de submarinos).

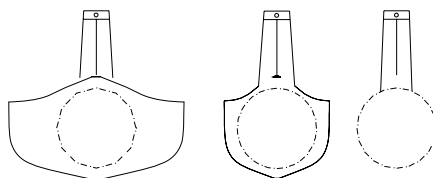


Figura 92 - À esquerda híbrido, no centro, submarino duplo casco de mesmo deslocamento, à direita submarino monocasco

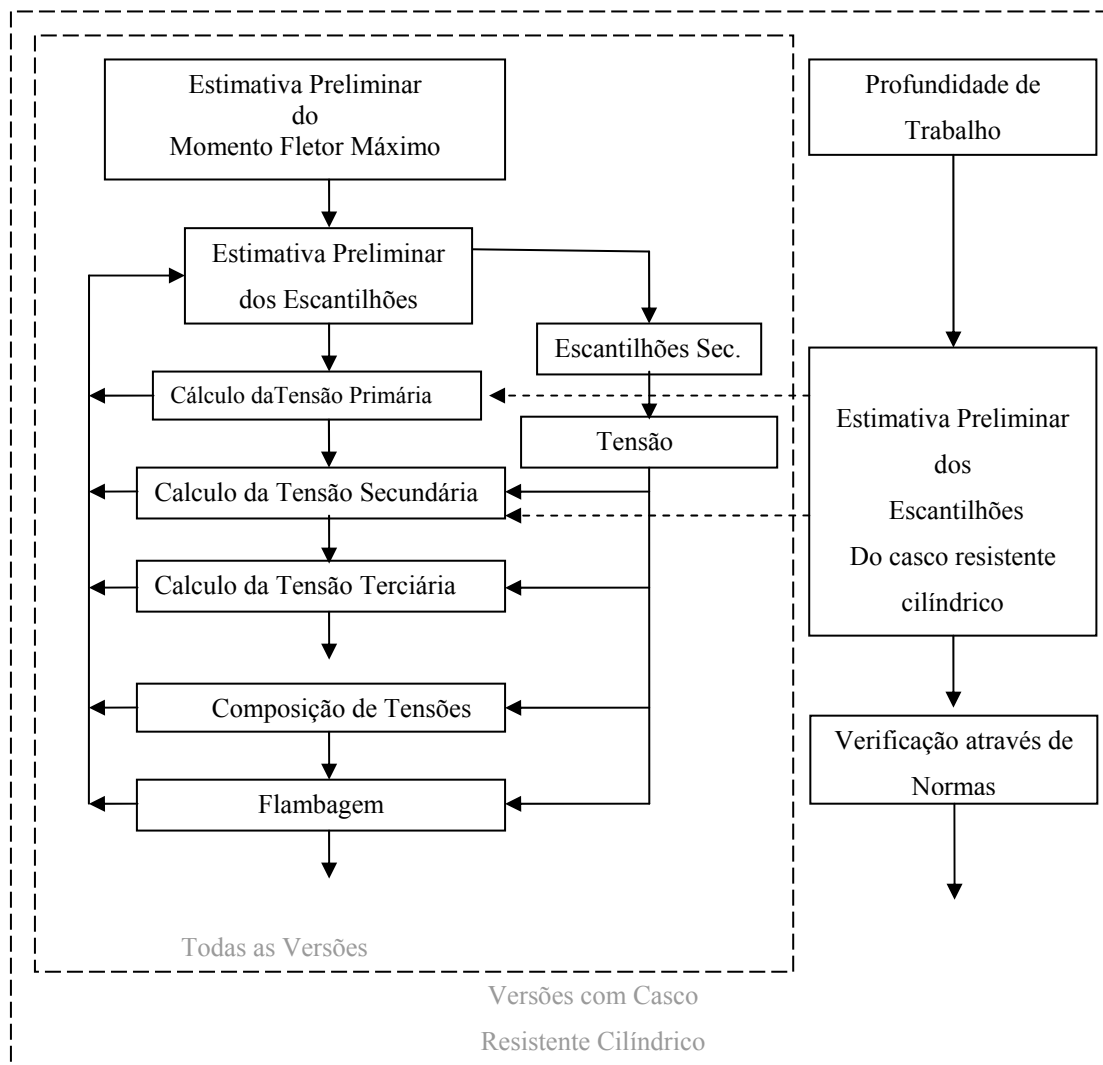


Figura 93 – Fluxograma do Projeto Estrutural

Assim a estrutura dimensionada é, para todas as versões, a estrutura de um navio de superfície (casco hidrodinâmico) associada a um casco cilíndrico interno, quando houver.

A estimativa preliminar dos escantilhões do casco resistente fornece, para a estrutura primária, participação no módulo e para a estrutura secundária condições de contorno.

Apesar de desenvolvido para a versão V2A, o procedimento estrutural apresentado nesse tópico é o mesmo das versões V4, V5, V5A e V6.

5.21.1 DEFINIÇÕES PRELIMINARES

5.21.1.1 CRITÉRIOS

Para o dimensionamento preliminar da estrutura, adotam-se dois conjuntos independentes de carregamentos, modelos de cálculo e tensões admissíveis: um para o caso do casco hidrodinâmico; e, outro, para o caso do casco resistente cilíndrico, de modo a verificar se a estrutura atende ou não ao projeto.

5.21.1.2 MATERIAIS PARA O CASCO RESISTENTE

A norma ABS (Rules for..., 2002) deixa-se aplicar aos seguintes materiais:

- (i) Aços: ABS CS, E, EH32, EH36; U.S. Navy Graus HY-80 e HY-100 pela MIL-S-16216; ASTM A516 Graus 55, 60, 65, 70; ASTM A537 Classe 1 e 2; ASTM A517 graus, A, B, E, F, J
- (ii) Alumínio (Al): ASTM B209 ligas 5083, 5086, 5456, 6061-T6
- (iii) Liga de Titânio (Ti): ASTM B265 Grau 5
- (iv) Aço Inoxidável: ASTM A240 Tipo 304 ou 316
- (v) Acrílico: ASTM D702

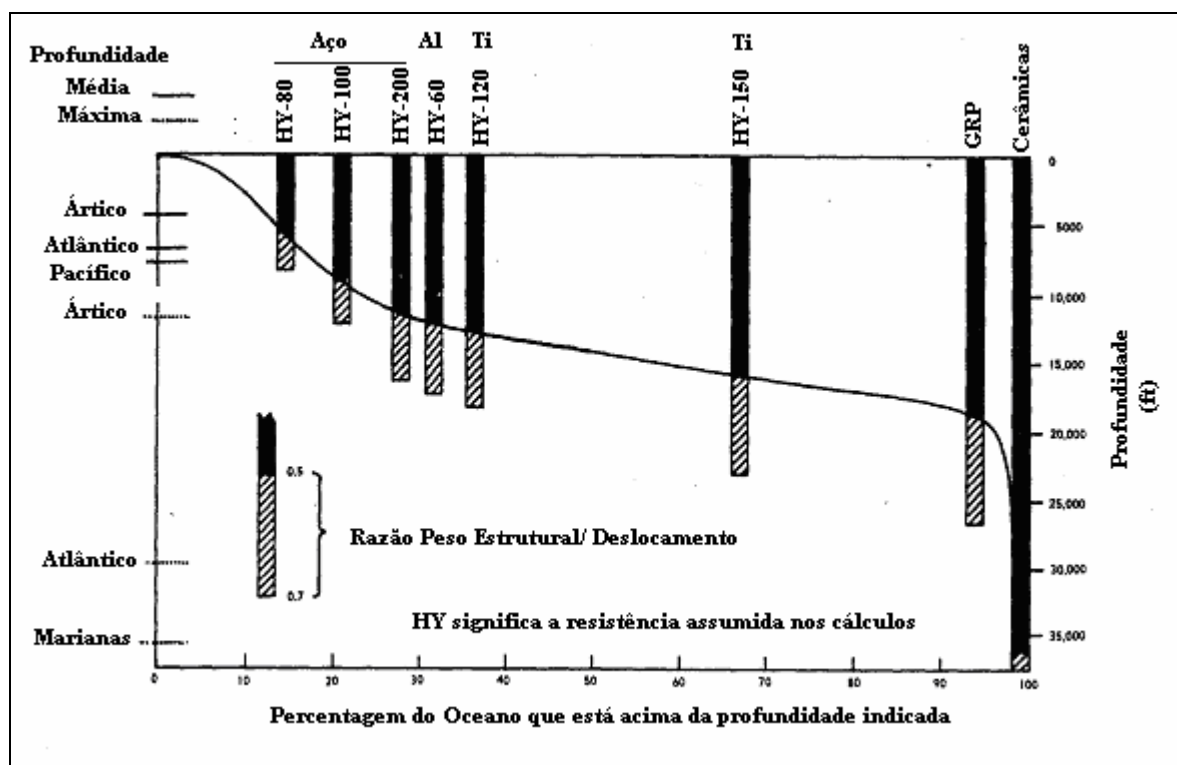


Figura 94 – Al – alumínio, Ti - titânio (adaptado de Gilmer, 1970), pp. 302.

Segundo SILVA et al. (1996a), busca-se um material que minimize a relação peso estrutural/deslocamento. Gilmer (1970), p. 302, apresenta um gráfico de vários materiais empregados na construção naval de submarinos, aqui reproduzido na Figura 94.

Da Figura 94, percebe-se que os aços de tensões de escoamento menores que HY-100 apresentam boas relações peso estrutural/deslocamento, logo adota-se o HY-80. Note-se, que por ser menos resistente que os demais aços, apresenta um peso final maior que os demais para a mesma profundidade.

A título de comparação apresenta-se Tabela 57 em que aparecem vários materiais e seus valores de E , ρ e σ_y , os materiais apresentam também o valor de elongação até a ruptura.

Tabela 57 – Lista de Materiais.

Material	E (GPa)	σ_y (MPa)	ρ (t/m ³)	ruptura
Aços anteriores a 1948 ¹	205	415	7.87	
HY-80	205	552	7.87	
HY-100	205	689	7.87	
Fibra de Vidro (Genérica)	68.9	3310	2.44	4.8%
Alumínio 6061-T913	69	460	2.77	
Alumínio 5086-H34	71	255	2.66	10%

Fonte: 1- Silva et al. 1996a, 2- <http://www.matweb.com>, ac. 25/03/2004

5.21.1.3 MATERIAIS PARA O CASCO HIDRODINÂMICO

Pensou-se, a princípio, em se utilizar para o casco hidrodinâmico o mesmo material do casco resistente, de forma a facilitar o acoplamento entre ambos. A economia de peso, a perfeita adequabilidade do alumínio à construção naval e a larga experiência de projetos em alumínio serviram para forçar por sua escolha em detrimento da escolha aço HY-80.

A economia calculada pela escolha do alumínio em detrimento à do aço é de cerca de 30 t, para a versão V2A. Assim opta-se pela liga Al 5086-H34, por ser um alumínio naval, que, além das propriedades mecânicas, apresenta boa resistência à corrosão e soldabilidade.

A norma ABS (Rules for..., 2002) refere-se a navios cujo casco resistente seja praticamente o casco hidrodinâmico (seja ele cilíndrico ou elíptico) e, portanto, um casco que deve resistir a grandes pressões.

As versões de casco resistente cilíndrico do híbrido, ao contrário dos navios de que trata a ABS (Rules for..., 2002), utilizam-se do casco hidrodinâmico para resistir

apenas aos carregamentos na superfície, pois, quando submersas, o interior dos cascos hidrodinâmicos dessas versões está alagado. Dessa forma, cria-se uma maior liberdade na escolha dos materiais do casco hidrodinâmico, pois está submetido a menores pressões e, portanto, mais bem guardado de falhas.

5.21.2 PROCEDIMENTO PARA O CÁLCULO DA ENVOLTÓRIA HIDRODINÂMICA

Os modernos submarinos têm seus cascos hidrodinâmicos dimensionados para resistir a pequenas pressões, em virtude da ocupação do interior dos espaços do casco resistente por fluidos, como água ou óleo, tanto quando estão na superfície, quanto quando estão submersos.

O casco hidrodinâmico do híbrido é vazio na superfície. Submerso, porém, iguala-se ao casco de um submarino, pois se recheia de fluidos, donde a pressão suportada ser muito menor. A pior condição enfrentada pelo casco hidrodinâmico do híbrido é, então, na superfície. Assim o casco hidrodinâmico deve ser calculado como um casco de navio de superfície e não como o casco de um submarino.

A estrutura típica de um navio de superfície é considerada uma estrutura leve, composta de chapas finas, ortogonalmente reforçadas por perfis, formando o elemento denominado de painel estrutural.

Na direção longitudinal do navio, localizam-se os reforçadores leves e pesados e, na direção transversal, têm-se os anéis de reforço e as anteparas, as quais também têm sua estrutura formada por painéis.

O procedimento para o cálculo estrutural racional dos navios é particionado e interativo: primeiramente efetua-se o cálculo da estrutura longitudinal, e em seguida o cálculo da estrutura transversal. Essa forma de calcular parte de uma hierarquização das falhas do navio:

- (i) colapso: falhas que levam ao colapso total da embarcação;
- (ii) ruína: falhas que levam ao colapso de compartimentos;
- (iii) avaria: falhas que levam ao colapso de painéis.

A divisão das falhas, por sua vez, leva à divisão didática dos efeitos dos carregamentos atuantes no navio.

Os efeitos desses carregamentos são as tensões. As tensões são intimamente ligadas às deformações. Assim a classificação das tensões surge da classificação das deformações que lhe são associadas, dessa forma dividindo-se em:

- (i) primárias: o navio se deforma como uma viga ao longo de seu comprimento, mantendo as seções transversais indeformadas;
- (ii) secundárias: composta de duas parcelas: a primeira corresponde aos painéis se deformando, com curvatura contínua entre as anteparas, agregando elementos longitudinais e transversais; a segunda corresponde à flexão dos elementos longitudinais leves entre dois elementos transversais adjacentes;
- (iii) secundárias transversais: a deformação ocasionada pela pressão hidrostática nas cavernas. A interação entre a estrutura transversal e longitudinal acontece através dos longitudinais pesados que funcionam como molas (cujas constantes de elasticidade dependem do módulo de Young do material e de outros parâmetros);
- (iv) terciárias: são as deformações, por flexão, das unidades de chapeamento – porção de chapa entre enrijecedores adjacentes – sob efeito da pressão hidrostática.

O cálculo típico da estrutura do navio considera que o navio é uma viga, ou seja, seções planas permanecem planas, donde se pode aplicar a superposição das deformações e se tratar o problema como um problema linear.

Considerações de simetria de comportamento entre elementos contínuos garantem que qualquer trecho da estrutura, por exemplo, um longitudinal leve entre dois anéis transversais adjacentes, possa ser extraído do restante e ter sua resistência avaliada através de modelos analíticos simples da Mecânica das Estruturas.

Para o cálculo da estrutura secundária o longitudinal leve pode ser tratado como uma viga com extremidades engastadas sob carga uniformemente distribuída.

A estrutura terciária, que é a unidade de chapeamento, pode ser tratada como placa, e, igualmente, considerar-se com extremidades engastadas sob carga uniformemente distribuída.

A estrutura transversal era calculada como um pórtico, no passado. Essencialmente, usava-se o método de Cross, fazendo-se a modelagem de forma que a cada quina ou encontro com longitudinais pesados utilizava-se uma condição de contorno, (mola, engaste ou apoio) na forma que melhor conviesse. Utiliza-se, aqui, o cálculo com modelo bidimensional com elementos de viga (por elementos finitos).

As tensões, resultantes destas três classes de deformações e com as mesmas denominações, são superpostas, compostas, através de um critério de resistência, e confrontadas com os limites adequados para cada composição em cada ponto da estrutura.

5.21.2.1 MODELOS DE CÁLCULO

5.21.2.1.1 ESTRUTURA PRIMÁRIA

A estrutura primária é modelada pela teoria simples de viga, momento fletor dado pela fórmula $\Delta L/C$, onde C é um valor adimensional, típico, entre 30 e 100.

A BV-104 (1981) recomenda a utilização da metade do cortante máximo para o cálculo das tensões resultantes na seção mestra. Nesse trabalho foi adotado o cortante máximo, no dimensionamento preliminar. Utiliza-se o cavernamento longitudinal.

A Figura 95 apresenta a seção mestra a ser calculada já com os escantilhões finais.

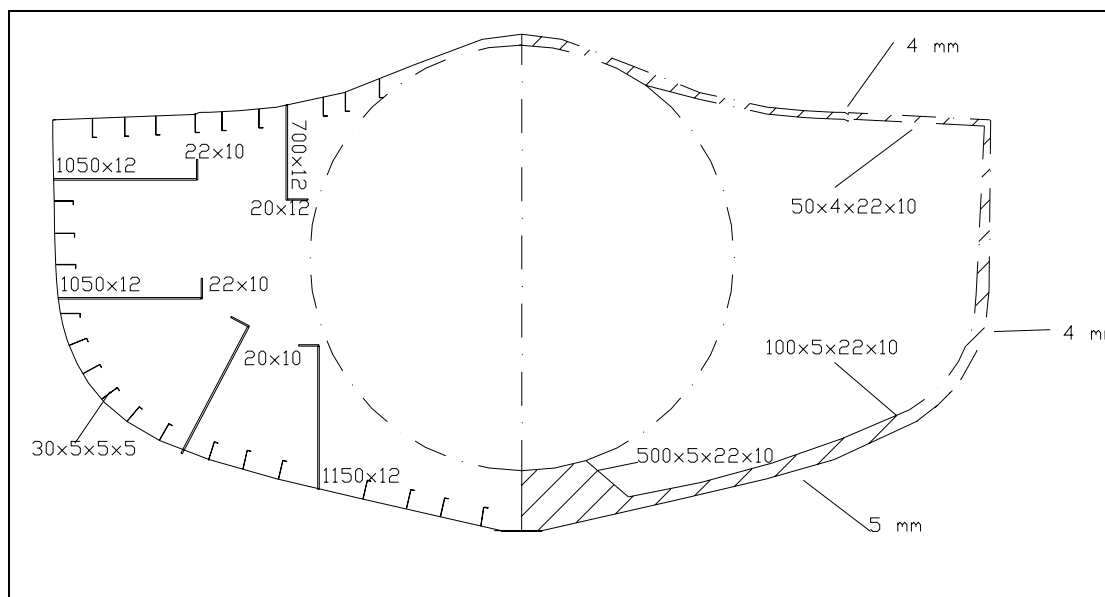


Figura 95 – Desenho da seção mestra

5.21.2.1.2 ESTRUTURA SECUNDÁRIA LONGITUDINAL

Para a estrutura secundária longitudinal, de acordo com a BV-104 (1981), é utilizada a teoria simples de viga.

Os perfis secundários pesados consideram-se engastados com relação a seus apoios, ou seja, as anteparas, por razões de simetria.

Os longitudinais leves consideram-se engastados nos elementos de rigidez de ordem de grandeza superior, ou seja, as cavernas e, por conseguinte, também engastados

as anteparas, também por simetria. As tensões são então calculadas pelas seguintes formulações:

Engaste :

$$\sigma_2 = \frac{p \times s \times b^2}{12 \times w} \quad (46)$$

Centro :

$$\sigma_2 = \frac{p \times s \times b^2}{24 \times w} \quad (47)$$

onde :

p = carregamento hidrostático sobre a chapa da viga;

s = espaçamento entre vigas;

b = vão livre;

w = módulo de resistência da viga.

A largura da chapa colaborante foi calculada a partir da digitalização da figura 5-2, lados biengastados, da BV-104 (1981) em função da relação distância entre momentos nulos, ln, e s, espaçamento entre vigas.

$$c = 0.0033(s/\ln)^3 - 0.0699(s/\ln)^2 + 0.4787(s/\ln) - 0.0086 \quad (48)$$

onde c é a largura de chapas colaborante e ln é a distância entre pontos de momento nulos.

5.21.2.1.3 ESTRUTURA SECUNDÁRIA TRANSVERSAL

Essa estrutura será avaliada como um pórtico plano 2D, mas decomposto em elementos de viga e calculado através de um programa de computador, SAP90, cuja única interação com os longitudinais verifica-se nas extremidades. Cada elemento transversal reforçador, ou seja, cada caverna constitui o flange e a alma de um perfil “I” que tem por base uma porção de chapeamento (calculada por (48)).

Essa porção de chapeamento que constitui a base (aba) do perfil I é dita *chapa colaborante* e representa um valor arbitrado de largura de chapa, em que a distribuição de tensão seria uniforme e igualaria a força resultante das tensões atuantes no chapeamento que, em verdade, não têm distribuição uniforme, mas são maiores junto às almas decrescendo em direção à meia distância entre eles (efeito de *shear lag*).

A Figura 96 ilustra o modelo de cálculo. O engaste é entendido como a interação entre o casco resistente e a caverna e também por simetria.

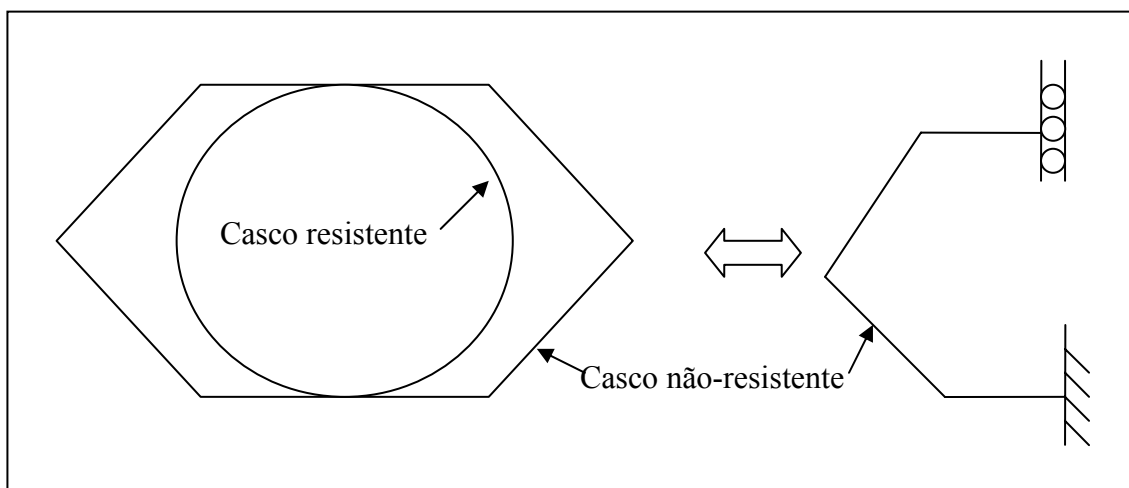


Figura 96 – Modelo da estrutura transversal

5.21.2.1.4 ESTRUTURA TERCIÁRIA

Utiliza-se para a estrutura terciária, também por razões de simetria, o modelo de chapas engastadas nos quatro lados, considerando deflexões pequenas comparadas com sua espessura. A tensão é, então, calculada pela seguinte fórmula :

$$\sigma_3 = k_3 \times p \times \left(\frac{b}{t}\right)^2 \quad (49)$$

onde – p, pressão lateral na chapa; b , largura da chapa; t , espessura da chapa

O fator k é obtido através da equação (50) da digitalização da figura 5-5 da BV-104 (1981) (para chapas com todos os lados engastados):

$$k_3 = 0.0685(a/s)^3 - 0.5036(a/s)^2 + 1.2263(a/s) - 0.4884 \quad (50)$$

onde a é distância entre transversais, s- largura de carga

5.21.2.1.5 FLAMBAGEM

A verificação da flambagem assume papel importante, pois a estrutura é grandemente dependente do módulo de elasticidade que no caso do alumínio é E=69 GPa menor que no aço E=205 GPa, o que implica uma perda de estabilidade estrutural. A BV-104 (1981) prevê verificações distintas:

- (i) chapa ortotrópica simples (por exemplo, para as unidades de chapeamento);
- (ii) chapa com prumos (por exemplo, convés entre vaus e sicordas);
- (iii) grelha ortotrópica (por exemplo, convés entre duas anteparas);

- (iv) flambagem local de vigas;
- (v) flambagem lateral de vigas.

As demais análises de flambagem propostas pela norma referem-se a pilares. Esses elementos, que ainda não apareceram nessa fase de projeto, têm seus escantilhões estimados iguais aos escantilhões dos perfis pesados, para efeito apenas do cálculo de peso.

A Figura 97 permite perceber que a verificação de flambagem de chapas se passa de um nível micro para outro macro, como se fosse um *zoom*, desde a unidade de chapeamento, menor, até a chapa com reforços e, finalmente, a chapa entre anteparas com reforçadores longitudinais e transversais.

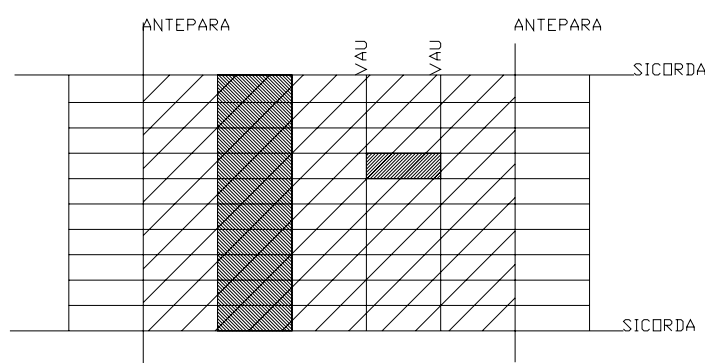


Figura 97 – Representação das três formas de flambagem em chapas.

5.21.2.1.6 FLAMBAGEM DE CHAPAS ISOTRÓPICAS SIMPLES

De acordo com a BV-104 (1981), considera-se a flambagem das chapas simples, como as que não possuem reforços, por exemplo, as unidades de chapeamento limitadas por vaus e longitudinais, de acordo com a Figura 98:

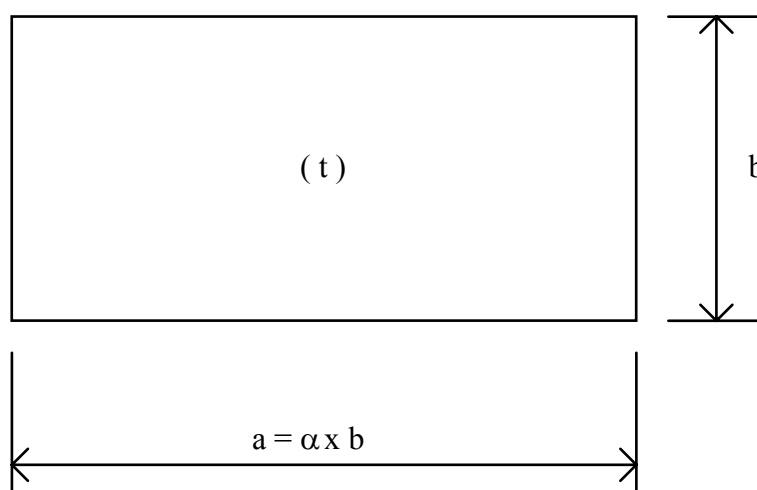


Figura 98 - Figura 5-9 da BV-104 (1981)

A verificação quanto à flambagem das mesmas é feita efetuando-se os seguintes cálculos :

Tensão crítica de flambagem

$$\sigma_{IK} = K_{\sigma} \sigma_e \quad (51)$$

$$\tau_K = K_{\tau} \sigma_e \quad (52)$$

onde :

$$\sigma_e = 0.904E \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (53)$$

onde σ_e é a tensão de referência de Euler. b – largura da chapa. K_{σ} e K_{τ} coeficientes de flambagem.

Para o cálculo da flambagem, onde o comportamento que interessa é aquele na direção da compressão, pode-se considerar as chapas simplesmente apoiadas nos quatro lados, resultando nos seguintes coeficientes de flambagem :

$$\alpha \geq 1 \Rightarrow K_{\sigma} = 4,0 \quad (54)$$

$$\alpha \geq 1 \Rightarrow K_{\tau} = 5,34 + \frac{4,00}{\alpha^2} \quad (55)$$

$$\alpha < 1 \Rightarrow K_{\sigma} = \left(\alpha + \frac{1}{\alpha} \right)^2 \quad (56)$$

$$\alpha < 1 \Rightarrow K_{\tau} = 4,00 + \frac{5,34}{\alpha^2} \quad (57)$$

onde $\alpha = a/b$ é a relação entre os lados da chapa, definida na Figura 98.

Nos casos em que há tensões de compressão e cisalhamento agindo ao mesmo tempo, tem-se :

$$\sigma_{vk} = \frac{\sqrt{\sigma^2 + 3 \times \tau^2}}{\frac{1}{4} \times \frac{\sigma}{\sigma_{IK}} + \sqrt{\left(\frac{1}{2} \times \frac{\sigma}{\sigma_{IK}} \right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_K} \right)^2}} \quad (58)$$

onde σ_{vk} é a tensão de flambagem equivalente

A tensão real de flambagem (σ_{vkr}) deve ser calculada de acordo com a Tabela 58 :

Tabela 58 – Tensão Real de Flambagem

σ_{vk}	σ_{vkr}
$\sigma_{vk} \leq 0,6 \times \sigma_y$	$\sigma_{vkr} = \sigma_{vk}$
$0,6 \times \sigma_y < \sigma_{vk} \leq 2,04 \times \sigma_y$	$\sigma_{vkr} = \sigma_y \times \left(1,474 - 0,677 \times \sqrt{\frac{\sigma_y}{\sigma_{vk}}} \right)$
$2,04 \times \sigma_y \leq \sigma_{vk}$	$\sigma_{vkr} = \sigma_y$

Deve ser verificado se ⁵:

$$\frac{\sigma_{vkr}}{\sigma_{\text{von Mises}}} \geq 1,25 \quad (59)$$

Se a chapa tiver comportamento de viga, ou seja, se $\frac{1}{\alpha^2 \times K_\sigma} > 0,5$, a segurança à flambagem deve ser aumentada de 36%.

5.21.2.1.7 FLAMBAGEM DE CHAPAS COM REFORÇOS

As formulações mostradas neste item se aplicam, por exemplo, às unidades de chapeamento situadas entre vaus e sicordas, de acordo com a figura a seguir:

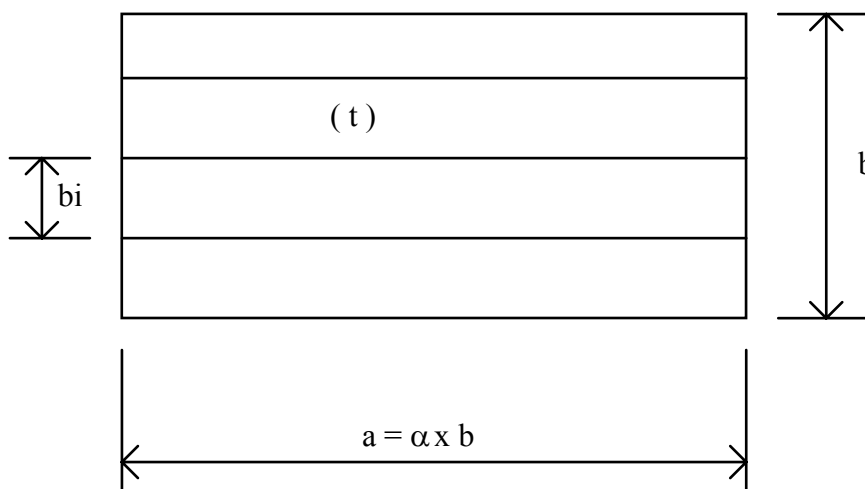


Figura 99 – Adaptado da figura 5-7 da BV-104 (1981)

A verificação quanto à flambagem é feita de modo análogo ao mostrado no item 5.21.2.1.6 com o seguinte coeficiente de flambagem para tensões de compressão :

$$K_\sigma = \frac{1}{1 + \eta \times \delta} \times \left[\left(\frac{1}{\alpha} + \alpha \right)^2 + \left(\frac{1}{\alpha} \right)^2 \times \eta \times \gamma \right] \quad (60)$$

$$\gamma = 10,92 \times \frac{I}{b \times t^3} \quad (61)$$

⁵ A tensão de Von Mises é a tensão equivalente como definida no item 5.21.4.2

$$\delta = \frac{F}{b \times t} \quad (62)$$

$$\eta = \frac{b}{b_i} \quad (63)$$

onde b é a largura da chapa total, F é a área de um perfil sem chapa colaborante e I , o momento de inércia do perfil com chapa colaborante.

Nestes casos de perfis sujeitos a compressão, a chapa colaborante deve ser calculada a partir da Tabela 59, sendo as variáveis mostradas na Figura 100:

Tabela 59 – Chapa colaborante à compressão (BV-104 (1981))

$\frac{b_i}{t \times \lambda_F} \leq 0,424$	$\frac{b'_i}{b_i} = 1$
$0,424 < \frac{b_i}{t \times \lambda_F} < 0,781$	$\frac{b'_i}{b_i} = 1,474 - 1,119 \times \frac{b_i}{t \times \lambda_F}$
$0,781 \leq \frac{b_i}{t \times \lambda_F}$	$\frac{b'_i}{b_i} = 0,366 \times \left(\frac{t \times \lambda_F}{b_i} \right)^2$

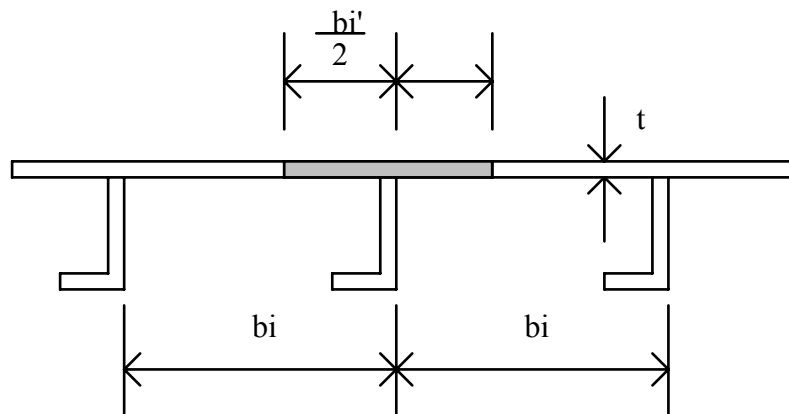


Figura 100- Reprodução da figura 5-8 da BV-104

$$\lambda_F = \pi \times \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} \quad (64)$$

5.21.2.1.8 FLAMBAGEM DA GRELHA ORTOTRÓPICA

Pode-se entender como grelha, uma unidade de chapeamento de dimensões $a \times b$ como na Figura 101, limitada por anteparas e longitudinais pesados (sicordas) com reforços longitudinais e transversais:

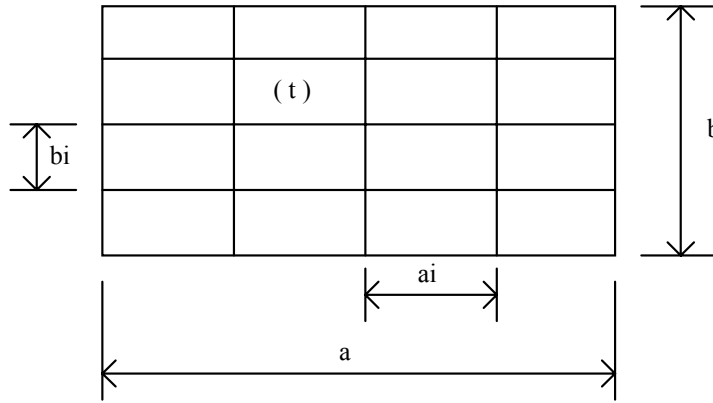


Figura 101 – Reprodução da figura 5-8 da BV-104 (1981)

Para compressão constante, a tensão crítica de flambagem deve ser calculada como:

para $\frac{a}{b} \times \sqrt[4]{\frac{1+N_y/N}{1+N_x/N}} \geq 1$, tem-se :

$$\sigma_{IK} = \frac{2 \times N \times \pi^2}{tm \times b^2} \times \left[1 + \sqrt{\left(1 + \frac{N_y}{N}\right) \times \left(1 + \frac{N_x}{N}\right)} \right] \quad (65)$$

para $\frac{a}{b} \times \sqrt[4]{\frac{1+N_y/N}{1+N_x/N}} < 1$, tem-se :

$$\sigma_{IK} = \frac{N \times \pi^2}{tm \times b^2} \times \left[\left(\frac{b}{a} + \frac{a}{b}\right)^2 + \frac{N_y}{N} \times \left(\frac{1}{b}\right)^2 + \frac{N_x}{N} \times \left(\frac{b}{a}\right)^2 \right] \quad (66)$$

onde :

$$N = 0,091 \times E \times t^3 \quad (67)$$

$$N_x = \frac{E \times J_x}{bi} \quad (68)$$

$$N_y = \frac{E \times J_y}{ai} \quad (69)$$

$$tm = t \times \left(1 + \frac{F_x}{t \times bi}\right) \quad (70)$$

onde J_x = momento de inércia do perfil longitudinal com chapa colaborante. J_y = momento de inércia do perfil transversal com chapa colaborante F_x = área da seção transversal do perfil longitudinal.

5.21.2.1.9 FLAMBAGEM LOCAL DE VIGAS

A flambagem de almas e flanges é observada nos longitudinais leves, entre dois perfis transversais e nos longitudinais pesados, entre duas anteparas.

Chamando de t (mm) a espessura do flange ou alma e b (mm) sua largura, a tensão de flambagem do flange é:

$$\sigma_k = 0.3842E(t/b)^2 \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (71)$$

Chamando de σ_D (N/mm²) a compressão máxima no flange, considera-se satisfeita a condição de flambagem se:

$$\sigma_k / \sigma_D > 1.7 \quad (72)$$

A BV-104 (1981) explica que os flanges e almas de reforços longitudinais têm suficiente segurança à flambagem, se forem preenchidas as seguintes exigências:

$$b = f t (E \sigma_D)^{1/2} \quad (73)$$

onde f vale 0.5 para flanges e 1.5 para almas.

5.21.2.1.10 FLAMBAGEM LATERAL DE VIGAS

A flambagem lateral de vigas também obedece ao mesmo coeficiente do item 5.21.2.3.

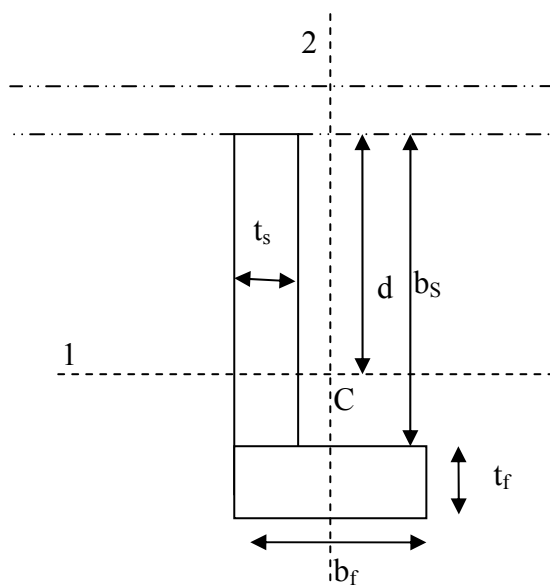


Figura 102 – Dimensões a serem consideradas na flambagem lateral de vigas, C é na linha neutra

Com base na Figura 102, definindo J_p como o momento polar de inércia do perfil com relação ao ponto C sem chapa colaborante, J_2 , como o momento de inércia do perfil com relação ao eixo 2 sem chapa colaborante, J_1 , como o momento de inércia do perfil com relação ao eixo 1 sem chapa colaborante e J_D , constante de torção como:

$$J_D = (b_s t_s^3 + b_f t_f^3) / 3 \text{ (mm}^4\text{)} \quad (74)$$

$$\sigma_{kio} = \frac{\pi^2 E}{J_p} \left[f J_2 b_s^2 + \frac{J_D}{26} \right] \quad (75)$$

A constante f é uma constante que converte J_2 dos perfis simétricos para $f J_2$ em assimétricos e pode ser obtida com o uso da Tabela 60:

Tabela 60 – Constante f em função de bs/bf (BV-104, 1981)

b_s/b_f	1.0	1.5	2	3	4	6	12	∞
f	0.25	0.36	0.47	0.56	0.62	0.7	0.85	1.0

Definindo σ_{kip} como:

$$\sigma_{kip} = 3.6E(t/s)^2 \quad (76)$$

e i como :

$$i = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{t_s}{t} \right)^3 \frac{s}{b_s} \frac{1}{1 - \sigma_{kio} / \sigma_{kip}} \right] \quad (77)$$

onde s é o espaçamento dos perfis

Pode-se obter a constante j, na Tabela 61:

Tabela 61 – Tabela para obtenção da constante j (BV-104, 1981)

i	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1.0	2.0	5	10	20	50	100	∞
j	4	3.1	2.3	2.0	1.8	1.7	1.4	1.22	0.11	1.06	1.05	1.03	1.02	1.0

Se $i < 0$ então $j=1$.

E finalmente obter-se o valor de tensão de flambagem, σ_k :

$$\sigma_k = j \sigma_{kio} \quad (78)$$

E novamente a verificação fica conforme item 5.21.2.3.

5.21.2.1.11 FLAMBAGEM DE PILARES

Em nenhuma das versões estudadas foram acrescentados pilares, ou seja, elementos que assumem o carregamento proveniente de anteparas superiores.

5.21.2.1.12 FLAMBAGEM DE VIGAS POR CARGA ORTOGONAL

A norma prevê que sejam mantidos os espaçamentos entre apoios, d, como:

$$d \leq 12b \quad (79)$$

onde b é a largura do flange.

5.21.2.1.13 COMPOSIÇÃO DE TENSÕES

A composição de tensões foi feita seguindo-se o formato constante na página 108 da BV-104 (1981), que recomenda que sejam calculadas as tensões pelo critério de *Von Mises* para todos os painéis estruturais do navio, nos seguintes pontos mostrados pela Figura 103:

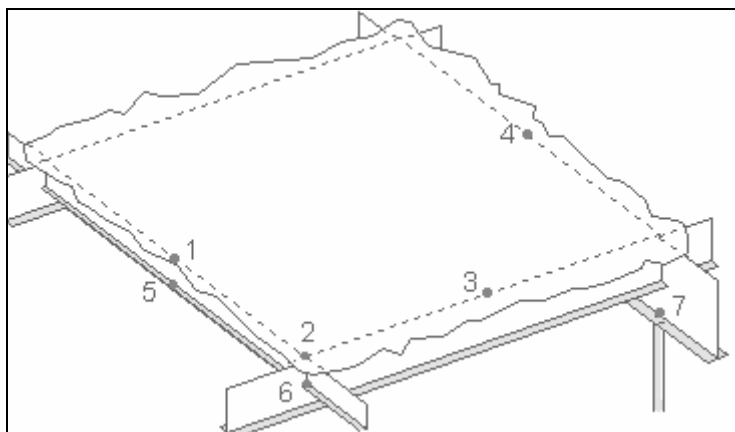


Figura 103 - Pontos do cálculo de tensão

Na verificação efetuada acrescentou-se o ponto 8, acima do ponto 7 na chapa. Tal verificação se deu apenas porque havia a informação disponível, sem, entretanto, maiores consequências.

5.21.2.1.14 MARGENS DE CORROSÃO

Adotou-se como margens de corrosão a mesma adotada por Carvalho et al., 1996a:

- (i) Fundo e linha d'água = 1.5 mm;
- (ii) Costado e conveses expostos = 0.6 mm.

Essa margem de corrosão é um valor empírico de chapa a ser adicionada à espessura do chapeamento, que fisicamente pertence ao casco, mas não participa do cálculo estrutural, sendo, contudo, componente de peso.

5.21.2.2 CARREGAMENTOS

5.21.2.2.1 ESTRUTURA PRIMÁRIA

Todo o carregamento do navio é devido a sua interação com o mar, ou seja, resultante de pressão e do seu peso próprio; entretanto essa distribuição, ora hidrostática, ora hidrodinâmica e hidrostática, gera dois tipos de carregamentos distintos:

- (i) momento fletor e força cortante primários;
- (ii) pressão hidrostática lateral;

A torção não é significativa, primeiramente, por razões de simetria de carregamento, e , além disso, porque o navio enquanto anel é altamente resistente à torção (FREITAS, 1979).

A BV-104 (1981) pede que sejam efetuadas 9 condições distintas de carregamentos. O processo ora adotado é, preliminarmente, calcular-se o momento fletor e cortantes máximos a partir de formulações empíricas e posteriormente conferir seus valores com os obtidos da curva real de momento fletores e cortantes, depois de dimensionado o peso por metro da estrutura e demais componentes do peso, bem como o acréscimo de uma onda senoidal como prevê a norma.

Assim, como valores preliminares para o cálculo, tem-se:

$$Mf = \Delta LWL/C \quad (80)$$

$$Qf = \pi Mf / Lwl \quad (81)$$

Onde Mf , momento fletor máximo e Qf é a cortante máxima.

Faz-se um dimensionamento a favor da segurança com $C = 8$, para alquebramento e $C = 16$ e para tosamento, porque se consideram condições severíssimas jamais passíveis de serem encontradas em um navio. O primeiro valor refere-se a uma viga biapoiada, o segundo a uma viga biapoiada com metade do valor do comprimento, o que ainda assim é ligeiramente menor que o valor de uma viga biengastada, que seria $C = 12$. Dessa forma, obtém-se os valores de 1188 tm para Mf e 102 t para Qf , como mostrado na Tabela 62.

Com os valores de Qf e Mf , parte-se para o dimensionamento da seção mestra.

Tabela 62 – Carregamentos de projeto

	Alquebramento	Tosamento
Momento	1188	-1014
Cortante	102	-56

5.21.2.2.2 ESTRUTURA SECUNDÁRIA LONGITUDINAL

A BV-104 (1981) recomenda o carregamento do costado por uma pressão quase estática para os casos de alquebramento e tosamento correspondente à altura de coluna d'água indicada na Figura 104:

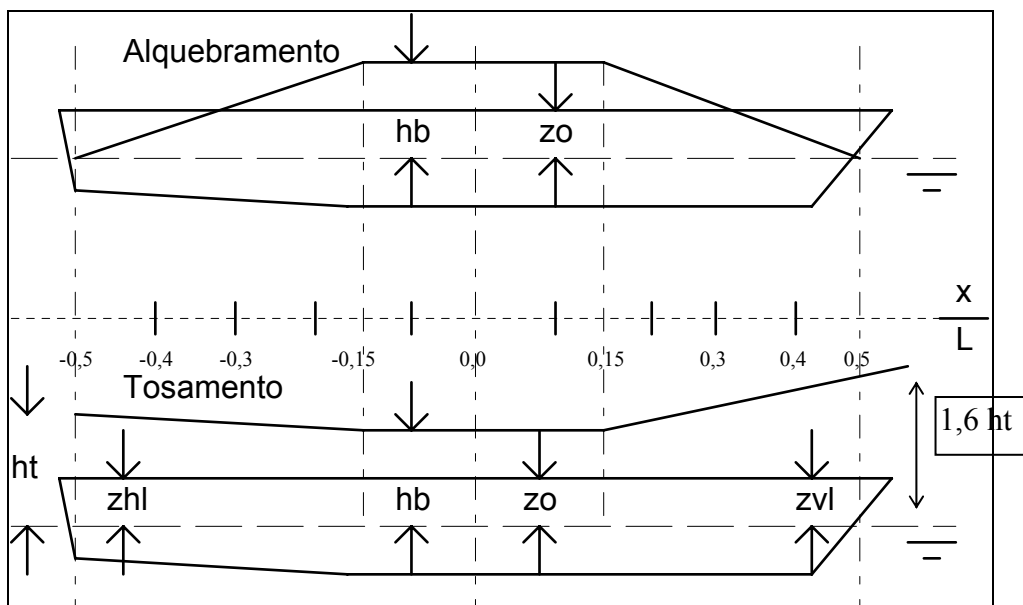


Figura 104 – Coluna de água para alquebramento e para tosamento

Onde :

$$hb = L / (15 + L / 20) - \text{alquebramento}; \quad (82)$$

$$ht = L / (12 + L / 20) - \text{tosamento}; \quad (83)$$

$$zo = \text{borda livre a meia nau}; \quad (84))$$

$$zhl = \text{borda livre à ré} \quad (85)$$

$$zvl = \text{borda livre à vante} \quad (86)$$

Para os conveses expostos, o carregamento devido ao embarque de água deve ser determinado de acordo com a linha de altura de pressão mostrada Figura 105:

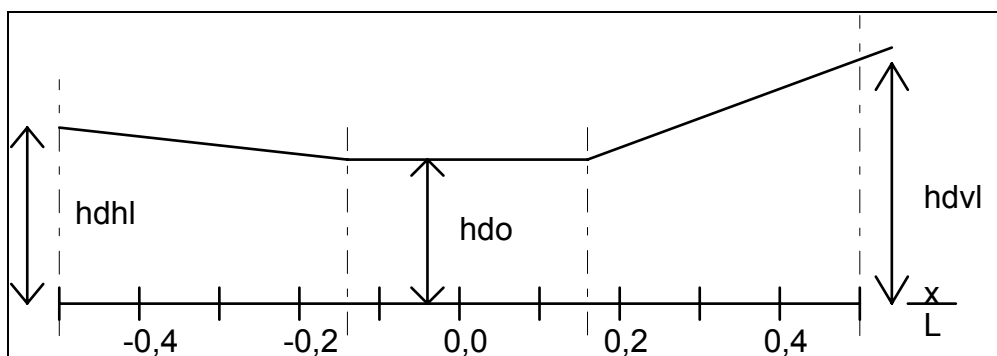


Figura 105 – Carregamento para os conveses expostos

Onde :

$$hdl = ht - zhl \quad (87)$$

$$hdo = hb - zo \quad (88)$$

$$hdvl = 1. ht - zvl \quad (89)$$

Devem ser fixados como valores mínimos $h_{dl} = 0.6$ m, $h_{do} = 0.6$ m, $h_{dvl} = 1.2$ m.

Para as anteparas internas, a norma recomenda que o carregamento mínimo seja de 0.2 mca, enquanto nas anteparas estanques, esse carregamento deve ser tomado como a pressão devida à altura da coluna d'água existente em casos de alagamento, acrescida de 1 metro.

Isso resulta nos seguintes valores de pressão da Figura 106:

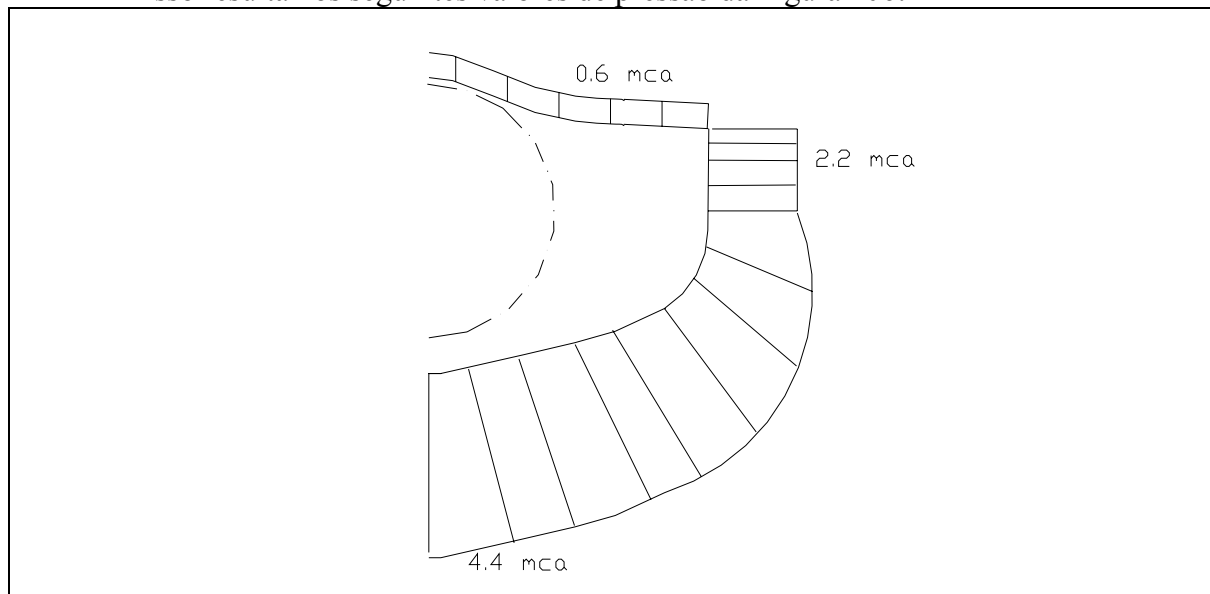


Figura 106 -Carregamento Hidrostático

5.21.2.3 TENSÕES ADMISSÍVEIS

Resumidamente, como explicado nos itens precedentes, a Norma BV 104 prevê os seguintes valores para tensões admissíveis:

- (i) tensões primárias: $k_1=2$;
- (ii) tensões secundárias: $k_2=1.5$;
- (iii) tensões terciárias: $k_3=1.0$;
- (iv) flambagem de unidades de chapeamento: $k_4= 1.25$;
- (v) flambagem de enrijecedores longitudinais: $k_5=1.7$;
- (vi) flambagem de painéis reforçados: $k_6=1.7$.

Os valores admissíveis para vigas são dados por (para o alumínio, veja a tabela completa no item 5.2.6 da BV-104):

Tabela 63 – Valores admissíveis para as vigas

Esbeltez	20	30	50	60	100	110	130	150
Fator	1.00	1.07	1.32	1.47	2.65	3.21	4.48	5.96

5.21.3 PROCEDIMENTO PARA O CÁLCULO DO CASCO RESISTENTE CILÍNDRICO

O procedimento se dá com uma estrutura preliminar cujos elementos ficam melhor ilustrados com o uso da Figura 107 e cujas dimensões são apresentada na Tabela 64. A partir desses valores iniciais, verifica-se a estrutura com o uso da norma ABS(Rules ...,2002),.

Tabela 64 – Escantilhões do casco resistente cilíndrico

Casco Resistente	Valores em metros
espaçamento de cavernas	0.5
espessura do casco	0.012
altura da alma	0.12
espessura da alma	0.012
largura do flange	0.08
espessura do flange	0.012

5.21.3.1 MODELOS DE CÁLCULO

A estrutura típica de um submarino é composta de anéis circulares, onde a tensão se distribui de forma a resistir a grandes pressões, ditos anéis estruturais.

O cálculo da tensão atuante num submarino é o mesmo que se poderia efetuar em um vaso de pressão, não fosse o fato de que, por se tratar de pressão externa, existe, associada à tensão normal, um efeito de flambagem, que é agravado em virtude da falta de circularidade do casco.

A falta de circularidade é um dado construtivo que depende da precisão mecânica do construtor do casco de pressão. Costuma ser maior em vasos de pressão de pressão maiores e menor em vasos menores. Esse trabalho adota o valor de 7.8×10^{-4} sugerido pela norma ABS.

No caso do casco resistente da versão V2A, não há cavernas gigantes, donde todos os reforçadores seriam considerados pesados, o que implica utilizar-se de um vão maior no cálculo da resistência.

A norma ABS (Rules for..., 2002) define alguns parâmetros geométricos da casca cilíndrica e posteriormente parte para as seguintes verificações:

- (i) Resistência do casco entre os anéis;
- (ii) Reforçadores pesados;

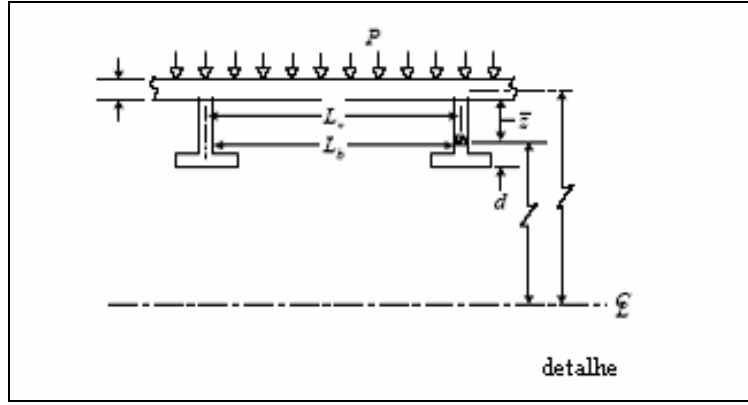


Figura 108 – Detalhe da Figura 107 constante na Figura 3, seção 6, da norma ABS (Rules for..., 2002)

5.21.3.1.1 RESISTÊNCIA DO CASCOA ENTRE ANÉIS

Os reforçadores são os perfis, como na Figura 107, do interior do casco resistente cilíndrico. A casca é a chapa entre esses elementos.

$$P_m = \frac{2.42E[t/(2R)]^{5/2}}{(1-\nu^2)^{3/4}[L/(2R) - 0.45(t/(2R))^{1/2}]} \quad (96)$$

$$P_y = \frac{\sigma_y t/R}{(1-F)} \quad (97)$$

para anéis internos:

$$A = A_s \frac{R}{R_s} \quad (98)$$

para anéis externos:

$$A = A_s \left(\frac{R}{R_s}\right)^2 \quad (99)$$

$$F = \frac{A[1-\nu/2]G}{A + t_w t + 2NtL/\theta} \quad (100)$$

Definindo P_c como:

$$P_c = P_m/2, \text{ se } P_m/P_y \leq 1 \quad (101)$$

$$P_c = P_y [1 - P_y/(2P_m)], \text{ se } 1 < P_m/P_y \leq 3 \quad (102)$$

$$P_c = 5P_m/6, \text{ se } P_m/P_y > 3 \quad (103)$$

A máxima pressão admissível com base na resistência de cascas entre reforçadores, P_a , é então dada por:

$$P_a = 0.8P_c \quad (104)$$

A pressão limite correspondente à tensão de escoamento dos reforçadores com base na resistência de cascas, P_1 , é então dada por:

$$\gamma = \frac{A[1 - \nu/2]}{A + t_w t + 2NtL/\theta} \quad (105)$$

$$P_1 = \frac{2\sigma_y t}{R} \left[1 + \gamma H \left(\frac{12}{(1 - \nu^2)} \right)^{1/2} \right] \quad (106)$$

A máxima pressão admissível com base na pressão limite correspondente à tensão de escoamento dos reforçadores, P_a , é então dada por:

$$P_a = 0.67P_1 \quad (107)$$

5.21.3.1.2 FLAMBAGEM GLOBAL ENTRE OS REFORÇADORES PESADOS

Esse tipo de flambagem é dependente do número de lóbulos em que se espera que a estrutura vá flambar. Além dos parâmetros iniciais definidos na Tabela 64 é necessário encontrar-se o número de lóbulos que é fornecido pelo gráfico de Figura 109, extrato da norma na seção 6, figura 4.

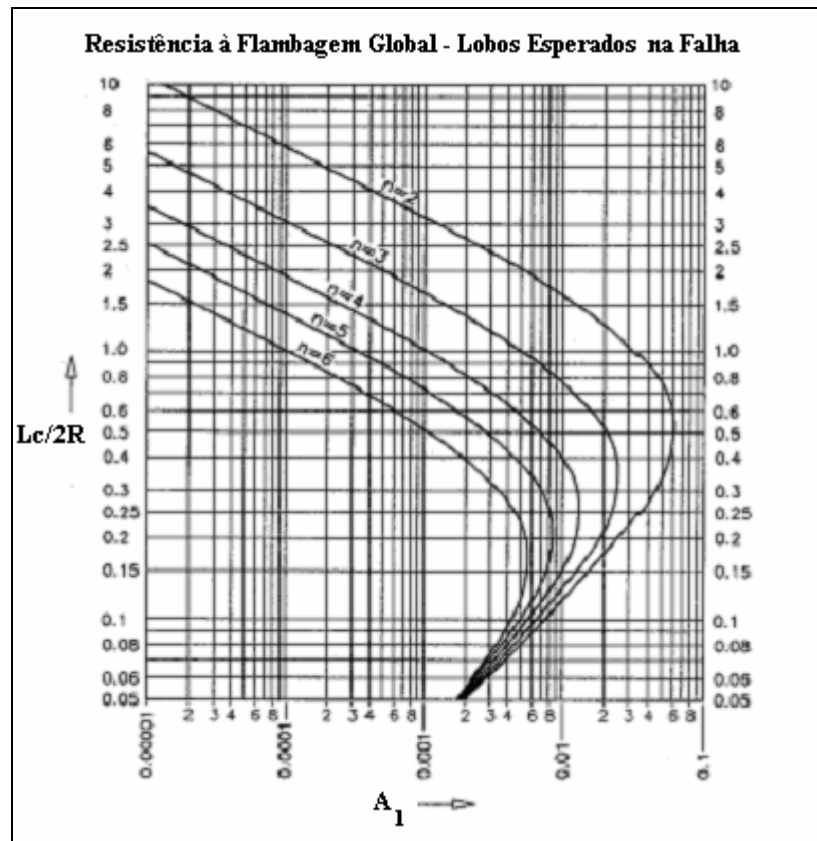


Figura 109 - Número de lóbulos , adaptado da norma ABS (Rules for..., 2002)

Os valores que aparecem na Figura 109, são obtidos das formulações seguintes:

$$A_2 = nl^2 - 1 \quad (108)$$

$$\lambda = \frac{\pi R}{L_c} \quad (109)$$

$$A_1 = \frac{\lambda^4}{(A_2 + \lambda^2 / 2)(nl^2 + \lambda^2)} \quad (110)$$

onde n é o nº de lóbulos, correspondente a condição que forneça a menor pressão.

De posse desse valor a pressão correspondente a esse modo de flambagem, P_n , é:

$$P_n = A_1 \frac{Et}{R} + \frac{EIA_2}{LR^3} \quad (111)$$

5.21.3.1.3 TENSÃO LIMITE PARA OS REFORÇADORES PESADOS

Definindo:

$$P_{n2} = \frac{3EI}{L_c R^3} \quad (112)$$

e

$$P_{yf} = \frac{\sigma_y t R_f}{R^2 (1 - \nu / 2 - \gamma)} \quad (113)$$

Resolve-se a equação proposta para P_t como:

$$\sigma_y = \frac{\sigma_y P_t}{P_{yf}} + \frac{3Ee_x \delta P_t}{(P_{n2} - P_t) R^2} \quad (114)$$

A pressão admissível fica sendo:

$$P_a = 0.5P_t \quad (115)$$

5.21.3.1.4 TENSÃO CIRCUNFERENCIAL

Definindo z com o centro de gravidade do perfil a partir da casca (como na Figura 107):

$$\sigma_t = \frac{EI_z}{A_s R z} \quad (116)$$

A tensão dada por σ_t tem que ser maior que a tensão de escoamento.

5.21.3.1.5 MOMENTO DE INÉRCIA MÍNIMO

O momento mínimo prescrito pela norma deve ser:

$$I_{ver} = \frac{PD_o L_s R_s}{3E} \quad (117)$$

5.21.3.1.6 CARREGAMENTOS

Para a estrutura do casco resistente cilíndrico, o casco resistente recebeu um carregamento hidrostático uniforme de 196.4 mca a partir do convés principal (máxima de 200 mca).

5.21.4 RESULTADOS DO CASCO HIDRODINÂMICO (VERSÃO V2)

5.21.4.1 MÓDULO DA SEÇÃO MESTRA

Os escantilhões podem ser obtidos da Figura 95. O módulo da seção mestra, que ora se apresenta preliminarmente, não leva em conta o módulo dos perfis pesados, pois estes foram dimensionados de modo a dar conta das tensões σ_2 e σ_3 e que, posteriormente, muito influenciaram no cálculo da flambagem. Note-se que isso é também uma posição conservadora.

A planilha que realiza o cálculo do módulo não será apresentada. Entretanto, ressalva-se que como o casco resistente é de aço e não de alumínio, sua área será convertida em uma área equivalente:

$$A_{cr_2} = \frac{E_{Aço}}{E_{Al}} A_{cr} \quad (118)$$

O resultado da linha neutra da seção mestra é de: 1821 mm acima da quilha. Os valores dos módulos de resistência são 0.6 m³ para o convés e -0.59 m³ para o fundo.

5.21.4.2 TENSÕES

As tensões, como explicado, são avaliadas em vários pontos do navio. Assim, opta-se por apresentá-las de acordo com o modelo da BV-104 que já prevê sua composição. Apresenta-se, ilustrativamente, o convés em alquebramento, na Tabela 65.

Lembre-se que a composição se faz por meio da tensão equivalente de Von Mises, σ_{eq} :

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{long}^2 + \sigma_{2t}^2 - \sigma_{long}\sigma_{2t} + 3\tau^2} \quad (119)$$

onde σ_{long} é a resultante aritmética das tensões, normais, onde se queira comparar.

Na Tabela 64, as colunas 1T, 1L, representam as tensões transversais e longitudinais respectivamente nesses pontos. Analogamente nos pontos 2, 3, 4, 5, 6 e 7 que aparecem na Figura 103, seção 5.21.2.1.13.

Tabela 65 – Modelo de preenchimento para o cálculo do critério. Convés em alquebramento

PONTO		1L	1T	2L	3L	3T	4L	4T	5L	6L	7L
1: σ_1		22.70		22.7	22.70		22.70		22.70	22.7	22.70
2: σ_{2p}	S	-39.00		-39	-39.0		-39.0				71.2
3: σ_{2l}	S	-1.41		-2.81	-2.81				8.02	8.02	
4: σ_{2t}	S		33.62	33.62		33.62		33.62		33.62	
	I		-38	-38.0		-38		-38		-38.0	
5: σ_3	S		-18.1	-18.1	-18.1			-18.1			
	I		18.1	18.11	18.1			18.11			
6: σ_3	S	-5.43				-5.43	-5.43				
7: $v\sigma_3$	I	5.43				5.43	5.43				
Soma das linhas de 1 a 7	S	-23.14	15.50	-3.62	-37.2	28.18	-21.7	15.50	30.72	45.54	93.87
	I	-12.28	-19.9	-36.2	-1.00	-32.6	-10.8	-19.9		49.0	93.87
8: τ_1		0.00		0	0.00	0	0.00	0	0	0	0
9: τ_{2p}	S	-45.0	-45.0	-45.0	-45.0	-45.0	-45.0	-45.0	-45.0	-45.0	5.18
10: τ_{2l}		-1.41	-1.4	-14.4							
11: τ_{2t}					-28.7	-28.7					
Soma linhas de 8 a 10		-46.40	-46.4	-59.4	-44.9	-45	-44.9	-45	-45	-45	5.2

Resumidamente, apresentam-se alguns valores das condições avaliadas, de acordo com as tensões admissíveis de 5.21.2.3.

Foram escolhidos as zonas mais carregadas dessas regiões. Ilustrativamente apresenta-se o resultado para alquebramento no fundo:

Tabela 66 - Verificação dos critérios nos pontos de interesse

Fundo	1L	1T	2L	3L	3T	4L	4T	5L	6L	7L
k3	130.66	0.00	40.97	135.22	0.00	124.89	0.00	84.54	95.47	46.20
k3	121.43	0.00	158.27	119.64	0.00	117.02	0.00	84.42	129.34	46.20
k2	194.00	0.00	40.41	195.78	0.00	185.33	0.00	126.81	143.21	69.29
k2	182.66	0.00	247.07	181.09	0.00	176.00	0.00	126.64	194.01	69.29

onde as tensões em MPa.

5.21.4.3 FLAMBAGEM ISOTRÓPICA

A flambagem isotrópica é resumida na Tabela 66 conforme item 5.21.2.1.6.

Tabela 67 - Flambagem isotrópica

	convés		Costado		Fundo	
	Alq	tos	alq	tos	alq	tos
Euler	7.16	7.16	12.7	12.7	19.9	19.9
σ_{vk}	130.36	110.8	219.8	249.0	176.1	348.6
σ_{vkr}	130.36	110.8	189.9	201.2	168.1	228.2
Von Mises	88.44	94.0	86.4	108.0	77.7	109.9
FS	1.5	1.2	2.2	1.8	2.2	2.1

onde as tensões estão em MPa.

5.21.4.4 FLAMBAGEM DA CHAPA COM REFORÇOS

Apenas se apresenta a flambagem com reforços que é resumida na Tabela 68, conforme item 5.21.2.1.7.

Tabela 68 - Flambagem da chapa com reforços

	Convés		Costado		Fundo	
	alq	tos	alq	tos	alq	tos
Euler	3.99	3.99	3.99	3.99	0.5	0.5
σ_{vk}	171.66	140.84	167.08	188.15	0.19	0.19
σ_{vkr}	165.46	140.84	162.60	174.89	0.005	0.005
Von Mises	73.33	78.68	84.37	105.71	-71.3	-48.48
FS	2.26	1.79	1.93	1.65	14.35	55.365

onde as tensões estão em MPa.

5.21.4.5 FLAMBAGEM DA GRELHA ORTOTRÓPICA

Apenas se apresenta a flambagem da grelha ortotrópica que é resumida na Tabela 69, conforme item 5.21.2.1.8.

Tabela 69 - Flambagem da grelha ortotrópica

Fatores	Convés	Costado	Fundo
σ_{klr}	282.3	322.7	282.5
σ_1 -alq	0	0	-22.83
σ_1 -tos	-10.4	0.00	0
FS.	27.1		12.4

5.21.4.6 FLAMBAGEM LOCAL DE PERFIS

Apresenta-se a flambagem local de perfis pesados e leves, conforme item 5.21.2.1.9.

Tabela 70 - Flambagem local de perfis pesados

	Convés	Costado	Fundo
E	69000.00	69000.00	69000.00
k	0.43	0.43	0.43
σ_e	22455.36	128.88	155.94
σ_k	9543.53	54.77	66.27
σ_l	-10.42		-22.83
σ_{2p}	68.06	46.89	53.37
FS	9543.53	54.77	66.27

Tabela 71 - Flambagem local de perfis leves

	Convés	Costado	Fundo
E	69000.00	69000.00	69000.00
k	0.43	0.43	0.43
σ_e	62376.00	62376.00	249504.00
σ_k	26509.80	26509.80	106039.20
σ_l	-10.42	0.00	-22.83
σ_{2p}	68.06	46.89	53.37
σ_{2l}	10.39	38.54	54.40
FS	10.42	0.00	22.83

5.21.4.7 FLAMBAGEM LATERAL DE PERFIS

Apenas se apresenta a flambagem lateral de perfis pesados e leves conforme item 5.21.2.1.10.

Tabela 72 - Flambagem de lateral perfis leves

	Convés	Costado	Fundo
J2	364.58	364.58	729.17
bs/bf	6.00	6.00	6.00
f^*J2	255.21	255.21	510.42
Jd	1458.33	1458.33	2916.67
σ_{kio}	10.35	10.35	6.70
σ_{kip}	1.55	1.55	6.21
i	-35.31	-35.31	-319.92
j	1.00	1.00	1.00
σ_k	10.35	10.35	6.70
FS	10.35	10.35	6.70

Tabela 73 - Flambagem de lateral perfis pesados

	Convés	Costado	Fundo
J ₂	108906.67	12631879.28	9443229.17
bs/bf	35.00	4.77	5.75
f*J ₂	102458.25	8222205.06	6515828.13
J _D	414720.00	678133.33	6056250.00
σ_{kio}	57.45	2028.40	1051.08
σ_{kip}	8.94	6.21	6.21
i	-15.36	-0.44	-3.71
j	1.00	1.00	1.00
σ_k	57.45	2028.40	1051.08
FS	57.45	2028.40	1051.08

5.21.4.8 ESTRUTURA TRANSVERSAL

A estrutura secundária transversal foi estimada por meio de um pórtico, com o programa de elementos finitos, SAP90.

Empregaram-se as mesmas pressões hidrostáticas de carregamento da estrutura longitudinal, para o costado, conveses e fundo, com os seguintes parâmetros:

Tabela 74 – Parâmetros de entrada do programa SAP-90

Comprimento	36.9000
Profundidade	2.2000
Altura do Convés	3.0000
distância longitudinal entre perfis - l	0.5000

E, de acordo com forma prevista para a entrada do programa, os perfis tiveram os escantilhões e características mecânicas dados pela Tabela 75:

Tabela 75 – Escantilhões dos Perfis da seção transversal

tw (m)	0.0150	espessura da alma
tfb (m)	0.0150	espessura do flange
t2b (m)	0.1000	largura do flange
tft (m)	0.0064	espessura da chapa colaborante
E (Pa)	6.9E+10	Módulo de Young em MPa
Poisson	0.3000	Coefficiente de Poisson
G (Pa)	2.654E+10	

A seção inserta foi (os pontos i, i+1, qualquer i, transformam-se no elemento i, donde há 13 elementos de viga):

Tabela 76 - Pontos para o cálculo da tensão transversal no SAP90

Pontos	y – (x no SAP90) (m)	z– (x no SAP90) (m)	alma (m)	Espessura (m)	Pressão (MPa)
1	0.0000	0.0000	0.5000	0.0050	
2	0.5873	0.1062	0.2000	0.0050	
3	1.1705	0.2474	0.1000	0.0050	
4	2.3351	0.5350	0.1000	0.0050	
5	2.8778	0.7865	0.1000	0.0050	
6	3.2705	1.2304	0.1000	0.0040	
7	3.4160	1.8081	0.0500	0.0040	2.2000
8	3.4378	2.4076	0.0500	0.0040	2.2000
9	3.4395	3.0000	0.0500	0.0030	0.7110
10	2.2399	3.0168	0.0500	0.0030	0.7110
11	1.6466	3.0941	0.0500	0.0030	0.7110
12	1.0689	3.2544	0.0500	0.0030	0.7110
13	0.5052	3.4601	0.0500	0.0030	0.7110
14	0.0000	3.6000	0.0500	0.0030	0.7110

Como se pode perceber, a espessura do convés do arquivo de entrada ainda está menor que a espessura final.

Note-se que apenas após o estudo de flambagem da estrutura longitudinal foi alterada a espessura do convés. A seção transversal não recebeu mais nenhuma alteração, o que é conservativo.

O nível de tensões encontrado por elementos de viga é apresentado na Tabela 77.

Tabela 77 - Normal, cortante, fletor e tensões

El.	Normal	Cortante	Fletor	Inercia	yn	σ_{topo}	σ_{base}	σ_{topo}	τ_{base}
1	22940	-85170	115992	4.2E-04	2.3E-01	-4.62	-58.34	-1.76	-3.02
1	22940	-71889	80860	4.2E-04	2.3E-01	-2.63	-40.07	-1.23	-2.10
2	18717	-68697	70229	5.4E-05	8.4E-02	25.12	-97.89	6.01	-5.03
2	18717	-55587	42278	5.4E-05	8.4E-02	16.16	-57.89	3.62	-3.03
3	18471	-47036	26872	1.3E-05	4.0E-02	128.51	-64.43	33.46	-3.38
3	18471	-38472	14047	1.3E-05	4.0E-02	68.73	-32.13	17.49	-1.77
3	18471	-21452	-3926	1.3E-05	4.0E-02	-15.04	13.15	-4.89	0.49
4	14112	-20394	-7287	1.3E-05	4.0E-02	-31.47	20.84	-9.07	0.92
4	14112	-16303	-10030	1.3E-05	4.0E-02	-44.26	27.75	-12.49	1.26
4	14112	-8230	-13696	1.3E-05	4.0E-02	-61.35	36.99	-17.05	1.72
5	9669	-9290	-15363	1.3E-05	4.0E-02	-69.90	40.40	-19.13	1.93
5	9669	2168	-16937	1.3E-05	4.0E-02	-77.24	44.37	-21.0	2.13
6	9650	0	-17065	1.2E-05	4.5E-02	-7.22	55.88	-2.43	2.70
6	9650	11731	-14140	1.2E-05	4.5E-02	-5.66	46.63	-2.01	2.24
7	11948	9463	-14140	3.3E-06	2.3E-02	-119.15	68.73	-32.56	3.30
7	11948	12829	-12464	3.3E-06	2.3E-02	-104.70	60.91	-28.70	2.91
7	11948	16030	-10297	3.3E-06	2.3E-02	-86.02	50.79	-23.71	2.40
7	11948	22212	-4551	3.3E-06	2.3E-02	-36.50	23.97	-10.48	1.06
8	12750	21802	-4551	3.3E-06	2.3E-02	-36.32	24.15	-10.48	1.06
8	12750	28853	10443	3.3E-06	2.3E-02	92.91	-45.85	24.05	-2.44
9	28990	-11348	6870	2.9E-06	2.7E-02	66.74	-38.02	15.82	-2.28
9	28990	-10223	3634	2.9E-06	2.7E-02	38.85	-16.56	8.37	-1.20
9	28990	-7975	-1827	2.9E-06	2.7E-02	-8.22	19.63	-4.21	0.61
10	29718	-4037	-2472	2.9E-06	2.7E-02	-13.59	24.10	-5.69	0.82
10	29718	-3476	-3033	2.9E-06	2.7E-02	-18.44	27.82	-6.99	1.01
10	29718	-2356	-3905	2.9E-06	2.7E-02	-25.95	33.60	-8.99	1.29
11	29766	1842	-3905	2.9E-06	2.7E-02	-25.94	33.62	-8.99	1.29
11	29766	4092	-2126	2.9E-06	2.7E-02	-10.60	21.82	-4.90	0.70
12	29362	6462	-2126	2.9E-06	2.7E-02	-10.70	21.71	-4.90	0.70
12	29362	7026	-1114	2.9E-06	2.7E-02	-1.98	15.00	-2.56	0.37
13	29980	6348	2431	2.9E-06	2.7E-02	28.73	-8.33	0.00	-0.81
13	29980	6839	3295	2.9E-06	2.7E-02	36.18	-14.06	0.00	-1.09
13	29980	7331	4223	2.9E-06	2.7E-02	44.18	-20.21	0.00	-1.40
13	29980	8313	6272	2.9E-06	2.7E-02	61.85	-33.80	0.00	-2.08

A Tabela 77 apresenta os elementos de viga (El), as tensões normais, encontradas no topo do elemento, o cisalhamento no topo e na base, todos de relevância para a composição de tensões.

A estrutura foi dimensionada tomando-se para a composição, a maior tensão dentre os elementos que compõem cada um dos trechos grandes conhecidos como: costado, convés e fundo. Para o dimensionamento em cada trecho, foi tomada a maior tensão entre a base ou o topo, combinada ao cisalhamento, conforme o caso.

5.21.4.9 VERIFICAÇÃO DOS ESFORÇOS PRIMÁRIOS

Esse item, apesar de inserto no seio das estruturas, só pode ser de fato apresentado após o cálculo do item peso, ou seja, o item pormenorizado 5.22. Assim, essa verificação é aqui apresentada apenas didaticamente e não na ordem em que foi obtida.

Uma vez estimado o peso estrutural do casco, passa-se a verificar os esforços atuantes de acordo com a norma. Assim, gera-se uma curva de momento fletor e outra de esforço cortante, nas condições de alquebramento e tosamento. O empuxo vem da informação das curvas de Bonjean.

Considera-se apenas a curva de carregamento máximo, pois não se tem ainda a distribuição de pesos por tanques, que permitiria perceber se nas demais condições previstas pela norma são mais extremas. Pode-se afirmar que não, pois todos os tanques são do tipo compensado (exceto aguada) e a distribuição prevista foi a que melhor atende à funcionalidade do navio, ou seja, os tanques sempre o mais próximo possível de seus utilizadores (óleo, máquinas; aguada, tripulação; etc).

O cálculo dos momentos gerados pelos pesos a bordo permitiu que se obtivesse uma posição longitudinal melhor distribuída para o lastro sólido (indispensável em qualquer submarino). Além disso, permitiu que se avaliasse o dimensionamento preliminar. Assim, tem-se o quadro comparativo entre os valores de partida do dimensionamento e os valores posteriormente obtidos no cálculo racional na Tabela 78.

Tabela 78 –Fletor tm e Cortante em t.

	Curva de Pesos		Dimensionamento	
	alq	tos	alq	tos
Fletor	515	-136	1199	-652
Cortante	-62.474	-8	102.	-55

5.21.4.9.1 CARREGAMENTOS

As ondas aplicadas são da forma do item 5.21.2.2.2, com a diferença de que a onda tem sua amplitude máxima aplicada à linha d'água e não como representa a Figura 104, que serve para o carregamento hidrostático do convés. Note como o casco resistente influencia o peso no centro do navio.

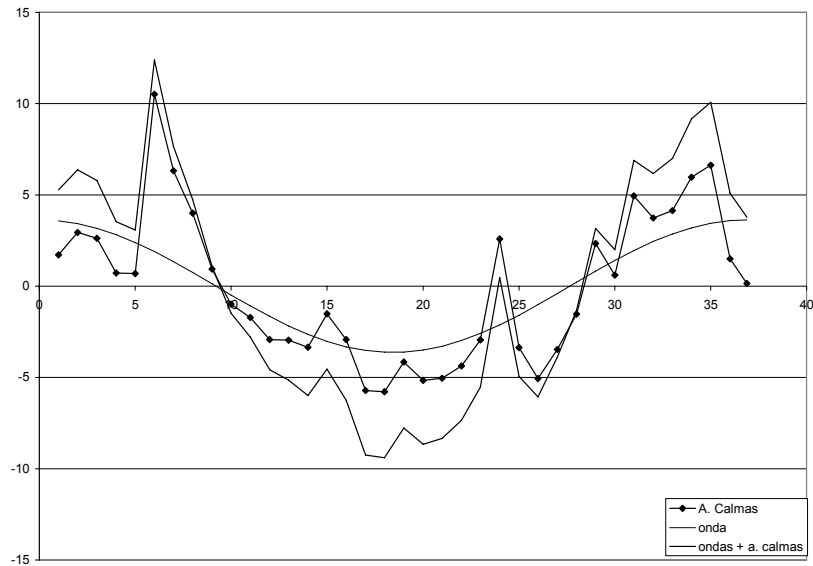


Figura 110 – Navio em tosamento

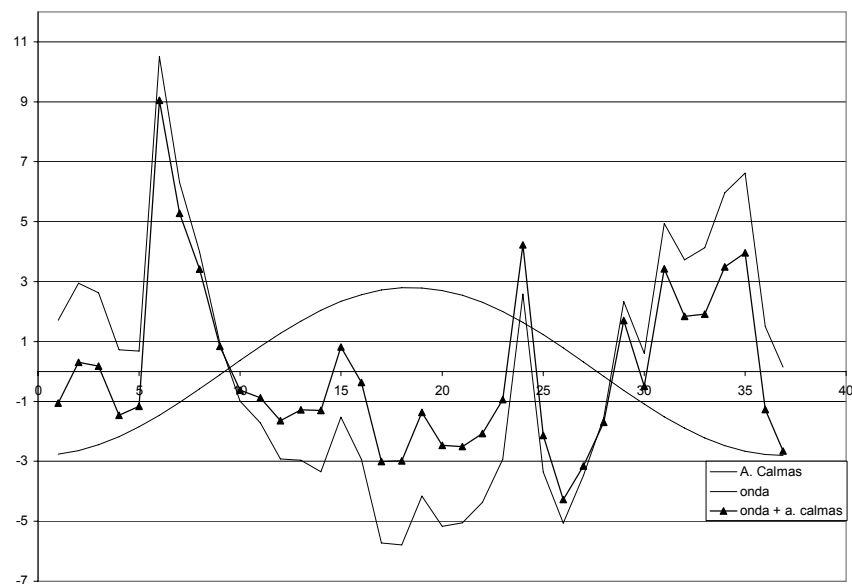


Figura111 – Navio em alquebramento

5.21.4.9.2 ESFORÇOS SOLICITANTES

Os esforços solicitantes são apresentados na Figura 112, para tosamento e na Figura 113, para alquebramento. Os valores de momentos fletores estão divididos por dez, para fins de conter na mesma figura, cortantes e fletores e permitir uma melhor visualização qualitativa da curva.

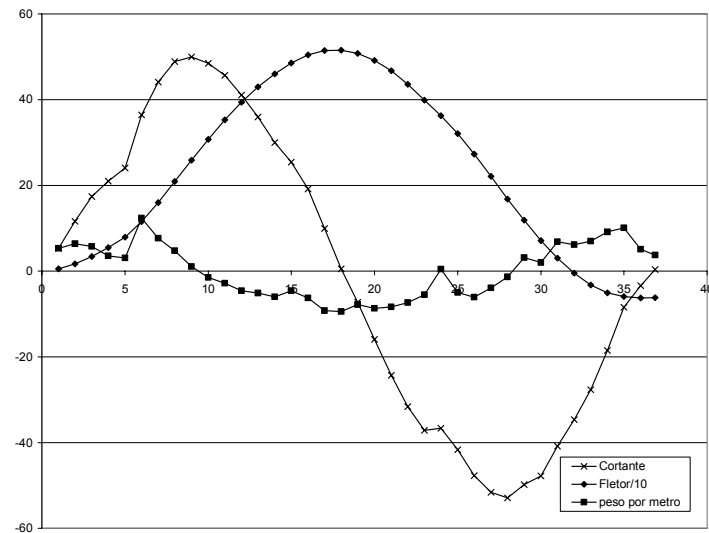


Figura 112 – Tosamento

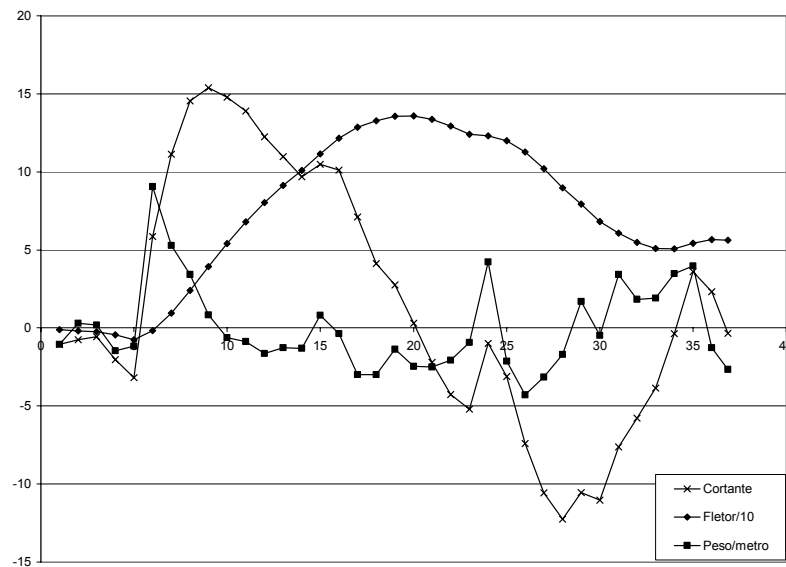


Figura 113 – Alquebramento

5.21.5 RESULTADOS DO CÁLCULO DO CASCO CILÍNDRICO (VERSÃO V2)

O casco cilíndrico foi estimado como se todo ele fosse cilíndrico, conservativamente, e não como de fato é, fechado por duas calotas semi-esféricas a vante e a ré. A calota esférica é mais leve e mais resistente que o casco cilíndrico, exceto na junção com o cilindro onde naturalmente se reforça mais (portanto, maior peso) sem contudo ser apreciável no montante global de peso estrutural do casco cilíndrico.

Se por um lado, o cálculo de todo o casco como cilindro parece acrescentar peso desnecessário, por outro lado permite maior liberdade ao projetista, dando uma noção do peso por metro de acréscimo do casco resistente, o que é muito importante nas etapas de projeto em que não se congelou o valor total do comprimento do casco cilíndrico.

O cálculo do casco resistente cilíndrico contou com os parâmetros de entrada constantes da Tabela 79:

Tabela 79 - Parâmetros de Entrada para dimensionamento do Casco Resistente cilíndrico

σ_y	551.00
E	331,000
v	0.30
P	2.00
R	1.56
ex	7.8e-4
Lcr	27.00
L	0.50
t	0.01
altura da alma	0.12
espessura da alma	0.01
largura do flange	0.08
tw –espessura do flange	0.01

E com os seguintes resultados, na Tabela 80 :

Tabela 80 – Valores obtidos para o casco resistente cilíndrico

Pm	5.14	
M	3.65	
Teta	4.70	
Q	2.35	
G	4.57E-03	
A	1.08	
N	1.02	
F	3.88E-03	
Py	4.25	
Pm/Py	1.21	
Pc	2.49	
Pa	1.99	pressão admissível com base na resistência de cascas entre reforçadores (N/mm ²)
H	1.04	
γ	0.85	
Pl	35.68	
Pa	23.90	pressão limite correspondente à tensão de escoamento dos reforçadores (N/mm ²)
l	0.25	
nl	2.00	
A ₂	3.00	
A ₁	7.22E-05	
Lc/2R	6.41	
I	1e-3	
Pn	4.54	
Pa	2.27	global entre os reforçadores pesados (N/mm ²)
Pn2	13.08	
R _f	1.44	
P _{vf}	7.83	
P _t	12.48	Valor achado por tentativa e erro, para solução da equação 100 (N/mm ²)
σ_v (Pt)	553.31	
Pa	6.24	limite de resistência do reforçador pesado à pressão
Iz	1.74E-06	
As	2.40E-03	
Zbarra	0.09	
σ_t / σ_t	1,782.8	
σ_v	3.24	Ok
I _{ver}	2.73E-04	
I _{ver} /I	0.27	Ok

5.22 PESO DO HÍBRIDO (V2A)

A finalidade desse tópico é simultaneamente a verificação do deslocamento preliminar, dos pesos e volumes dos sistemas auxiliares e a da obtenção dos valores necessários ao cálculo da estabilidade, seja submersa, seja na superfície.

5.22.1 MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE PESO

Para o cálculo dos pesos do navio costuma-se dividir os elementos componentes do navio em grupos de peso, ou melhor, grupos de itens que desempenham a bordo a mesma função.

Assim, tem-se o grupo associado a máquinas, outro grupo associado a estruturas, etc. Esse tipo de associação permite a estimativa racional do peso do navio.

Seguindo o exemplo da USN, utiliza-se nesse trabalho a classificação por SWBS (STRAUBINGER, CURRAN e FIGHERA, 1983). A filosofia alemã não observa a mesma classificação, mas divide o navio (submarinos, no caso) em Baugruppen, o que demonstra que qualquer classificação é válida desde que possa ser utilizada racionalmente.

Os SWBS constituem uma classificação hierárquica composta de dígitos que acrescidos para a direita, representam a pormenorização do grupo. Dividem o navio em 8 grupos. A Tabela 81 ilustra a classificação, bem como a estimativa que propõe Jackson (1992) para novos submarinos, a partir de outros conhecidos:

Tabela 81 – SWBS, ou grupos de peso (Ship Work Breakdown Structure)

Grupo	Descrição	Dependência
100	Estrutura	Deslocamento na superfície
200	Propulsão	Deslocamento na superfície e BHP
300	Eletricidade	Deslocamento na superfície e BHP
400	Comunicações e Controle	Dados
500	Sistema Auxiliares	Deslocamento na superfície e BHP
600	Acabamento	Deslocamento na superfície e BHP
700	Armamento	Dados
F	Carregamento Variável	Requisitos do Armador

O que se chama de grupo F seria melhor denominado 800, o que se faz presentemente.

Ao que Jackson (1992) entende por dados (*given*), ou seja, parâmetros conhecidos *a priori*, prefere-se atribuir, nesse trabalho, o título de parâmetros dependentes da missão, ou seja, sensores e armamentos compatíveis com os requisitos de missão. O modo de apresentação da Tabela 81 de Jackson (1992) se explica porque

esse autor tem a ótica de um engenheiro que tenha recebido o projeto de um certo comando militar e trata o problema dos requisitos da missão como premissas.

5.22.2 GRUPO 100 – ESTRUTURAS (APENAS V2A)

O grupo estimou-se racionalmente, como apresentado no item 5.21, à exceção dos jzentes de máquinas (SWBS 180), que assumem um valor com base em formulações empíricas apresentadas em Moura (1981). Apesar de aparentemente razoável, a estimativa através da potência desconsidera a qualidade da geração que no caso das instalações semelhantes é proveniente de motores Diesel e, portanto, mais pesada.

Estimou-se o peso apenas da versão V2A **TH**.

Tabela 82 - Grupo 100

ITEM	SWBS	PESO	x	y	z
Casco resistente	110	27.91	12.78	0.00	1.95
Casco não resistente	110	39.76	17.95	0.00	1.80
Jzentes das máquinas	180	5.57	5.32	0.00	0.97
Antepara estrutural	120	3.49	31.23	0.00	1.56
Total de estruturas		76.73	15.95	0.00	1.78
Posição Final		76.73	20.84	0.00	2.28

5.22.3 PESOS DEPENDENTES DA MISSÃO, GRUPOS 400 E 700

O projeto do híbrido é orientado a tarefas que dependem de sensores e de armamentos que assim são estimados por Moura (1981):

Tabela 83 – Grupo 400 e 300, peso dos armamentos e comunicações

Armamento/Comunicações	Peso
Subtotal	27.63

Esses pesos são fracamente independentes das formas hidrodinâmicas do navio, ao contrário, são-lhe fatores determinantes. Parte-se, portanto de 27.63 t para esses grupos, qualquer que seja a versão a ser estudada.

5.22.4 PESOS DE MÁQUINAS E ELETRICIDADE GRUPOS 200 E 300

Esse item apresenta as versões V1 **TH**, V2 **TH** e V3 **TH** V2A **TH**. No processo de projeto, criou-se a possibilidade de avaliar esses pesos e determinar-se com maior clareza qual a versão ganhadora. Dessa forma, é um item cujo cálculo foi preliminarmente efetuado, quando do arranjo do casco resistente, no item

5.10.2, de modo a orientar as decisões de projeto. Apesar disso, é apresentado apenas aqui.

Os grupos 200 e 300 representam a potência instalada necessária para atingir a velocidades de projeto, submersa e superfície.

O peso da propulsão está compreendendo também quadros elétricos necessários aos MEP, seus controladores, as engrenagens redutoras e os eixos (que normalmente estariam no grupo 500).

Os pesos desse grupo vieram do arranjo de três possibilidades, V1 **TH**, V2 **TH**, V3 **TH**:

Tabela 84 - Peso para as versões V1, V2 e V3

Item	Peso unitário	V1	V2	V3	total - 1	total - 2	total - 3
Baterias	0.56	18	18	36	10.13	10.13	20.27
Turbina(Eurodyn)	2.80	1	2	2	2.80	5.60	5.60
GEP (GM6.5L VA NA-186kW)	0.69	4	4	8	2.75	2.75	5.50
MEP	4.50	1	2	2	4.50	4.50	9.00
Propulsor	0.30	1	1	2	0.30	0.30	0.60
Eixo	x	3	8	5	2.70	8.32	5.40
Redutora	3.00	2	2	4	6.00	6.00	12.00
Escora	1.00	1	1	2	1.00	1.00	2.00
Quadros de Propulsão 1	0.85	1	1	2	0.85	0.85	1.70
Quadros de Propulsão 2	0.85	1	1	2	0.85	0.85	1.70
Outros - 10% de margem					2.68	4.03	6.38
Total					35.07	44.33	70.14

Nesse ponto se pode documentar, com mais clareza, o abandono da versão V1 **TH** e V3 **TH** em relação à versão V2 **TH**. Pode-se perceber que ela é relativamente muito mais leve, na relação Peso/BkW, como apresentado na Tabela 85:

Tabela 85 - Potência por Peso para as versões V1, V2, V3 do grupo 200 e parcela do grupo 300

	Peso	BkW total	Peso/BkW
V1	35.07	2600	0.013488
V2	44.33	5200	0.008525
V3	70.14	5200	0.013488

O valor empírico associado ao grupo 300, com referência a navios patrulha faz elevar o peso desse grupo, de 3.4 t, para o valor final, de acordo com o dimensionamento posterior.

Tabela 86 – Grupo 200 e 300 parcial, peso da propulsão

ITEM	SWBS	PESO	x	y	z
Baterias	223	3.94	2.69	1.09	1.95
Baterias	223	1.69	1.786	-1.09	1.95
Baterias	223	4.51	1.626	0	1.95
Turbina(Eurodyn)	234	2.80	4.283	-0.54	1.95
Turbina(Eurodyn)	234	2.80	8.335	0.54	1.95
GEP(GM6.5L VA NA-186kW)	220	1.37	14.08	-0.73	1.95
GEP(GM6.5L VA NA-186kW)	220	1.37	14.085	0.73	1.95
MEP	235	4.5	1.85	0	2.47
Hidrojato 1	247	4.53	-3.23	-1.02	1.95
Hidrojato 2	247	4.53	-3.23	1.02	1.95
Hidrojato 3	247	1.82	-1.9	0	2.47
Eixo 1	243	0.81	1.26	-0.54	1.95
Eixo 2	243	2.12	3.29	0.54	1.95
Eixo 3	243	0.23	0.36	0	2.47
Redutora	241	0.09	0.85	-0.54	1.95
Redutora	241	0.09	0.85	0.54	1.95
Escora	244	0	0	0	1.95
Quadros de Propulsão 1	324	1.7	22.80	-0.53	1.95
Quadros de Propulsão 2	324	1.7	23	0.53	1.95
Outros		4.06	20	0	1.95
Total		44.70	5.3	0.1	1.95
Zero da contagem			4.89	0	0.5
Posição final		44.70	10.2	0.07	2.45

5.22.5 NOTA ADICIONAL AOS GRUPOS 500 E 600

De difícil determinação precisa, parece ser necessário recorrer-se, em parte, a formulações empíricas para o cálculo desses pesos.

Uma boa referência é Moura (1981), entretanto, o valor por ele fornecido para esses grupos não pode ser simplesmente adotado.

Em primeiro lugar, porque o presente trabalho adota a classificação americana, SWBS, enquanto que Moura (1981), sem explicitar, deixa claro que os itens de peso não fazem precisamente parte dos mesmos grupos SWBS a que deveriam pertencer. As diferenças concentram-se sobretudo no grupo 500 e no grupo 600.

Em segundo lugar, a natureza híbrida da embarcação modifica a funcionalidade dos sistemas agrupados e resulta em necessárias modificações.

No grupo 600, por exemplo, o casco duplo do híbrido exige uma estimativa muito maior para o peso das tintas, pois apresenta uma área 3 vezes maior que para

submarinos de casco simples, de mesmo volume. Logo é interessante obter-se uma estimativa racional.

Identicamente, o grupo 500 de Moura (1981) lida com submarinos na faixa de 1000 t, o que sobrecarrega vários sistemas, como o de balsas salva-vidas.

5.22.6 MÁQUINAS AUXILIARES, GRUPO 500

O grupo 500, máquinas auxiliares, compreende um importante grupo: compressores de ar, garrafas de ar comprimido, botes salva-vidas, lemes, etc.

Tais itens não foram pormenorizadamente calculados e seu valor provém de estimativa via Moura (1981) que prediz seu valor em torno de 5% do deslocamento submerso, assim totalizando 25.27 t.

Há grande quantidade de itens no grupo 500 e, em função dos sistemas auxiliares, o peso desses itens (25.27 t) foi verificado quando se pôde.

Tabela 87 - Grupo 500, sistemas auxiliares. VI - volume interno e VE - volume externo

Item	VI	Peso (t)	VE
aguada (SWBS 536)	0.05	0.00	
aguada (SWBS 536) GOR	0.64	0.29	
ar comprimido (SWBS 512)		8.4	4.55
ar comprimido (SWBS 512) compressor	2.00	1.65	
ar condicionado (SWBS 514)	15.00	0.90	
controle de atmosfera (SWBS 552)	3.60	1.80	
controle de avarias (CAV - SWBS 664)	0.34	0.5	
linha de eixo (SWBS 243)	0.38	0	
respiração em emergência	0.34	0.60	
separação de água e óleo (SWBS 264)	0.21	0.25	
tratamento de águas servidas (SWBS 592)	0.07	0.00	
(SWBS 592) tanques de efluente e séptico			5.04
Outros		7.2	
Peso total		21.62	

5.22.7 ACABAMENTO, GRUPO 600

O grupo 600, acabamento, compreende desde divisórias a revestimentos. Moura (1981) recomenda considerá-los 2.4% do deslocamento submerso.

Comparando-se a estimativa racional, com a formulação empírica tem-se um erro de 60%, pois o híbrido apresenta esse grupo no valor de 20.51 (para a versão V2A ).

5.22.8 PESO LEVE

A Tabela 88 apresenta o peso leve do navio para a versão V2A **TH**, versão ganhadora do conjunto V1 **TH**, V2 **TH**, V3 **TH** V2A **TH**. O lastro sólido vem para garantir o posicionamento do centro de gravidade de modo a tornar o navio estável, sem trim, nem banda.

Tabela 88 - Peso leve do navio

SWBS	Descrição	Peso	x	y	z
100	Estrutura	76.73	20.84	0.00	2.28
200	Máquinas	44.70	10.21	0.07	2.45
300	Eletricidade	7.26	18.00	0	2.06
400	Comunicações	23.61	24.13	0.00	2.60
500	Auxiliares	25.27	16.42	0.00	1.99
600	Acabamento	20.51	19.23	0	1.98025
700	Armamento	10.22	32.66	0	2.06
A-1	Soma	208.30	18.72	0.01515	2.27047
	Lastro Sólido	21.00	10.85	-0.1503	3.2
A	Peso Leve	229.30	18	0	2.3556

5.22.9 PESO CONSOLIDADO

A listagem a seguir apresenta o peso consolidado para versão V2A :

Tabela 89 - Peso Consolidado

SWBS	Descrição	Peso	x	y	z
100	Estrutura	76.73	20.84	0.00	2.28
200	Máquinas	44.70	10.21	0.07	2.45
300	Eletricidade	7.26	18.00	0	2.06
400	Comunicações	23.61	24.13	0.00	2.60
500	Auxiliares	25.27	16.42	0.00	1.99
600	Acabamento	20.51	19.24	0	1.98
700	Armamento	10.22	32.66	0	2.06
A-1	Soma	208.30	18.72	0.015	2.27
	Lead	21.00	10.85	-0.15	3.2
A	Peso Leve	229.30	18	0	2.35
VL	Peso Variável	30.54	21.75	0.00	1.15
	Deslocamento na Superfície	259.83	18.44	0	2.21
	Lastro	246.2	18.65	0	0.83
	Deslocamento Total	506.00	18.54	0	1.55

5.23 DIMENSIONAMENTO DE TANQUES (V2A)

5.23.1 INTRODUÇÃO

A finalidade do dimensionamento de tanques em um submarino, portanto no híbrido, é além avaliar o cumprimento de seus requisitos de funcionalidade, permitir verificar o equilíbrio estático quando submerso.

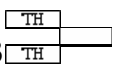
Os tanques são a entrada do calculo do polígono de equilíbrio e trazem consigo os volumes requeridos para os diversos sistemas do híbrido, assim como do submarino.

No trabalho foram aplicadas as formulações constantes nos trabalho de Silva et al. (1996a). Foi adotado o valor de 4% de perda de volume devido a elementos estruturais para determinar o volume moldado.

Foram estimados os seguintes tanques (que participam do peso do grupo 800 e do polígono de equilíbrio):

- (i) tanques de armazenagem de diesel;
- (ii) tanques de aguada;
- (iii) tanques de água destilada;
- (iv) tanque sanitário e tanque séptico;
- (v) tanque de óleo combustível;
- (vi) tanque de óleo lubrificante;
- (vii) tanque de óleo contaminado;
- (viii) tanque de dreno de óleo combustível;
- (ix) tanque de compensação de torpedos;
- (x) tanque de trimagem;
- (xi) tanques de compensação;
- (xii) pocetos;
- (xiii) tanques de lastro;
- (xiv) tanque de esnórquel.

5.24 ANÁLISE DA ESTABILIDADE (APENAS V2A)

Aplica-se a análise de estabilidade apenas à versão V2A , pois as demais versões, V1 , V2 , V3  estão descartadas. As versões V4 , V5 , V5A  V6  estudam-se apenas preliminarmente e também não lhe são verificadas a estabilidade, pois se considera que sejam estáveis por duas razões: grande espaço para lastro e porque têm dimensões principais e distribuição de peso semelhantes ou mais adequadas para garantir a estabilidade que a versão V2A .

5.24.1 ESTABILIDADE SUBMERSA PRELIMINAR

A estabilidade submersa resume-se ao exame da estabilidade intacta, porque nesta situação não existe reserva de flutuabilidade, o que significa que qualquer avaria causa o naufrágio do submarino.

A estabilidade intacta requer, por sua vez, somente, que o centro de gravidade esteja abaixo do centro de flutuabilidade.

Tomando os valores para a versão V2A , de acordo com a norma BV 1033.1:

Tabela 90 - Estabilidade Preliminar

Condição	Peso (ton)	Mest z (ton.m)	ZG	KB
Submerso	506.00	924.85	1.83	1.98
Superfície	259.83	718.17	2.76	

A altura do centro de gravidade do navio está dentro do valor limite empírico que representa estabilidade aceitável na condição submersa, o que facilita a manutenção da cota.

5.24.2 POLÍGONO DE EQUILÍBRIO (V2A)

Assim como na superfície, quando totalmente imerso na água, o equilíbrio estático do submarino ocorre quando o peso iguala o empuxo e o centro de gravidade (LCG) encontra-se na vertical do centro de empuxo (LCB, de *buoyancy*).

5.24.2.1 PERDA DO EQUILÍBRIO ESTÁTICO

Quando o peso fica diferente do empuxo ou o LCG diferente do LCB, o navio perde o equilíbrio estático. Com a variação de peso o navio ou sobe ou desce. Com a

variação de momento, há um momento hidrostático que faz o navio convergir para essa posição.

Fazem variar o peso do navio e criam momentos:

- (i) o consumo dos itens a bordo;
- (ii) as variações de densidade da água.

Essas perdas ou acréscimos de peso, bem como as variações de trim, podem ser compensadas através da modificação do volume de lastro. Por isso são criados, além dos Tanques de Lastro Principais, outros tanques, de lastro variável, chamados tanques de trim (que modificam o momento) ou de compensação (que modificam o peso).

Burcher e Rydill (1994) recomendam o dimensionamento desses tanques com o uso da formulação abaixo:

$$V_c = F[V_{cr}(\rho_{\max} - \rho_{\min})/\rho_{\min} + P_{\text{consumíveis}}/\rho_{\text{consumíveis}}] \quad (120)$$

Onde V_c é o volume dos tanques de compensação; F é um fator de utilização igual a 1.1 e representa as perdas de estruturas e de aspiração; $\rho_{\max}$ é o peso específico máximo da água salgada, 1.03 t/m^3 ; $\rho_{\min}$ é o peso específico para água doce, 1 t/m^3 , consumíveis, $\rho_{\text{consumíveis}}$ o peso específico médio de consumíveis, e $P_{\text{consumíveis}}$ o peso máximo dos consumíveis abordo.

Tal formulação permite uma boa compreensão das parcelas que compõem as variações de peso e volume do submarino e a importância de cada uma delas.

5.24.2.2 CAPACIDADE DE RECUPERAÇÃO DO EQUILÍBRIO

A avaliação da capacidade de recuperação do equilíbrio estático do submarino é feita mediante um gráfico, chamado polígono de equilíbrio.

Quando se preenchem alguns dos tanques de compensação e trim, são gerados pesos e momentos no submarino. Essa combinação de preenchimento pode, então, ser esboçada por um par (momento, peso).

O peso gerado é o somatório dos pesos dos tanques que foram preenchidos, não necessariamente até o topo. O momento, por sua vez, representa o somatório dos momentos desses pesos em relação ao plano transversal que contém o LCG.

O polígono de equilíbrio do submarino é uma curva traçada no plano (momento, peso), representando o lugar geométrico da envoltória dos pontos que

representam todas as combinações possíveis variando-se a quantidade de água dos tanques de trim e compensação.⁶

5.24.2.3 REQUISITOS PARA O TRAÇADO

O primeiro requisito para o traçado do polígono de equilíbrio é que o navio esteja sem trim e sem banda em sua condição inicial que é o deslocamento imerso, ou seja o peso do volume de água deslocado por todo o casco incluindo os pesos de consumíveis e excluindo-se apenas o peso da água contida nos espaços de livre circulação.

5.24.2.4 TRAÇADO DO POLÍGONO

No plano momento longitudinal x peso, cada vértice do polígono é o enchimento de um tanque. A ordem de enchimento é padronizada de proa para popa.

A partir do enchimento do último tanque inicia-se o esvaziamento destes na mesma seqüência anterior fechando-se assim o polígono na origem. Dessa forma a figura fica com um eixo de simetria, que passa pelos pontos da origem e pelo último tanque.

5.24.2.5 UNICIDADE DO POLÍGONO DE EQUILÍBRIO⁶

A lei que rege os vértices do polígono de equilíbrio é simplíssima: $\text{Momento} = \text{Peso} * \text{braço}$, onde Peso é o peso do tanque totalmente preenchido por água e o braço é a diferença entre LCG e a posição longitudinal do tanque.

Os pontos que representam os limites inferiores da região são os pontos mais afastados na proa. Como se começou da extremidade do navio, iniciou-se a construção com o maior momento possível e com o menor peso (acumulado). Aplicando-se a mesma regra de construção até a popa e, depois, esvaziando no sentido inverso, tem-se a garantia de envolver toda a região viável.

5.24.2.6 CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO

As condições de carregamento nada têm a ver com os tanques de trim e compensação. A BV 1033.1, alemã, prevê que sejam verificados os seguintes itens, (exaustivamente): óleo combustível, óleo lubrificante, água destilada, ar comprimido,

⁶ Para submersíveis que tenham os tanques simetricamente distribuídos com relação ao plano de simetria longitudinal

oxigênio , aguada, provisões, consumíveis do paiol, eletrólito de bateria e água salgada nos TOC.

As condições de carregamento, portanto, referem-se a pesos que estão fisicamente em pontos diferentes do navio, donde sua plotagem no plano (momento, peso) é totalmente independente da do polígono, que apenas considera os tanques de trim e compensação.

Consumidos os itens previstos em cada condição de carregamento seu lugar será ocupado por água ou não, fazendo um peso e um momento relativos à condição de equilíbrio carregada anterior que é a condição de plena carga.

5.24.2.7 ORIGEM DO POLÍGONO EQUILÍBRIO

O deslocamento submerso é a condição zero que dá origem ao cálculo das condições de carregamento. Esse deslocamento, como definido no glossário, corresponde ao submarino no início da comissão (viagem), na saída do porto, totalmente carregado com gêneros, tripulação, água de lastro, munição etc.

As condições de carregamento são calculadas como pesos e momentos a serem adicionados a essas condições.

5.24.2.8 VERIFICAÇÃO DO EQUILÍBRIO ESTÁTICO

Uma vez completado o polígono, cada condição de carregamento é plotada no mesmo gráfico. Caso se insira no interior, o navio tem capacidade de recuperação. Caso contrário, não há possibilidade de recuperação e o volume dos tanques, e posição do centro de gravidade (CG) do navio devem ser modificados.

A norma BV-1033.1, estabelece uma série de condições de carregamento que devem ser analisadas para determinação da eficácia dos tanques de compensação e trimagem, em outras palavras rege a construção e verificação do equilíbrio estático submerso.

A grande reserva de fluatibilidade do híbrido, seu casco duplo, os pequenos volumes requeridos para tanques de armazenamento e aguada tornam atípica a aplicação da regra na nova concepção. Assim a margem de segurança apresentada pelo polígono é muitas vezes superior a qualquer outro navio existente hoje.

5.24.2.9 APRESENTAÇÃO DO POLÍGONO

O polígono depende diretamente de todas as variáveis de projeto, em particular dos tanques. Assim, selecionamos os parâmetros de entrada e seus valores.

5.24.2.9.1 PARÂMETROS DE ENTRADA

A listagem representada pela Tabela 91 são os parâmetros necessários à construção do polígono de equilíbrio com os valores utilizados na versão V2A .

Tabela 91 – Parâmetros de entrada para Construção do Polígono de Equilíbrio

Peso Específico do OL (t/m^3)
Peso Específico do OD (t/m^3)
Peso específico do aço (t/m^3)
Peso específico da água salgada (t/m^3)
Limite superior de peso da água (t/m^3)
Limite inferior de peso da água (t/m^3)
Volume específico da estrutura
Deslocamento do casco resistente
Deslocamento superfície [t]
Comprimento total (m)
Comprimento do casco resistente
Diâmetro do casco resistente
Pontal(igual ao diâmetro para submarinos)
Calado
Tripulação ()
Autonomia (dias)
cota de operação (m)
Pressão de colapso (mca)
Número de torpedos
Outros
MBT

5.24.2.9.2 POLÍGONO

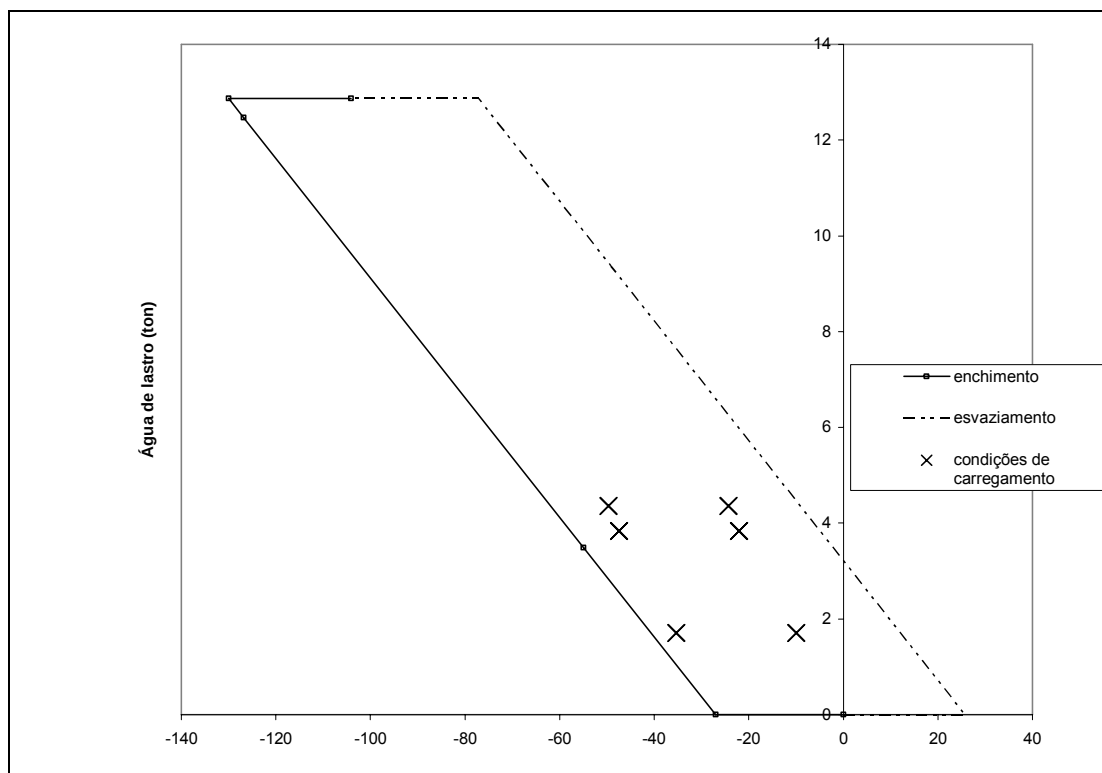


Figura 114 - Polígono de Equilíbrio

5.24.3 SUPERFÍCIE

A estabilidade na superfície no projeto de submarinos modernos é secundária porque estes operam praticamente todo o tempo submersos, exceto, na entrada e saída de portos, e em começos e términos de patrulhas.

As formas do submarino moderno geralmente o caracterizam por comportamento pobre no quesito estabilidade transversal na superfície.

O cálculo, entretanto, da estabilidade de submarinos na superfície é exatamente igual àquele de um navio de superfície.

O híbrido, ao contrário dos submarinos, passa grande parte do tempo na superfície e esse tipo de estabilidade assume relevância.

No estudo de estabilidade convencional da versão V2A , aplicam-se normas internacionais, sem maiores problemas. No caso, utilizam-se 2 critérios distintos: o critério da Guarda Costeira Americana, USCG e o critério da IMO A167. O primeiro refere-se especificamente a embarcações do porte do híbrido, e o segundo é mais abrangente, mas não menos indicado.

A Tabela 92 apresenta os valores de KG máximo obtidos para o híbrido V2A :

Tabela 92 - Tabela de KG máximos. 1- KG leve. 2- KG no carregamento de superfície.

T	Δ	KG (IMO A.167)	KG (USCG)	KG real
1.8	212	2.94	3.723	
1.88¹	229	2.76	3.659	2.37
1.9	233	2.724	3.644	
2	254	2.435	3.562	
2.03²	259	2.327	3.544	2.23
2.05	264	2.219	3.525	
2.1	275	1.704	3.487	

O navio é estável para o critério da IMO A.167, considerando-o alagável apenas a partir da boca de 1.9 na cota de 3.3 (altura da aspiração da turbina). O mesmo se passa quanto ao critério da USCG. Note-se que é apenas o ponto de alagamento que torna o critério de estabilidade intacta da IMO mais rigoroso.

Os pesos muito baixos do híbrido V2A , e sua reduzida área vélica implicam uma margem de segurança elevada quanto ao critério de ventos da USCG.

5.25 COMENTÁRIOS SOBRE A ESTABILIDADE

Qualquer versão do híbrido sempre deve apresentar um centro de gravidade bem baixo e grande estanqueidade, pois se trata de um navio de superfície que não possui superestrutura. Assim apresenta estabilidade satisfatória, *a priori*. Isso fica exemplificado ao se observar os valores encontrados para a versão V2A .

A reserva de flutuabilidade desse navio dispensa o cálculo do polígono de equilíbrio (reserva essa na faixa de 50%, ao contrário dos usuais 10 % a 15 % nos submarinos atuais).

Essa dispensa de observação do polígono ocorre porque as variações sentidas pelas condições de carregamento influenciam muito levemente o peso a bordo. O óleo carregado, por exemplo, não ultrapassa 7% do volume dos tanques de lastro e esse é o maior volume consumido a bordo.

Assim, pode-se dizer que o estudo de estabilidade na superfície dessas versões seja irrelevante para a verificação de viabilidade da concepção e que o estudo da estabilidade submersa fica dispensado, desde que os tanques de lastro ocupem o inferior do volume passível de ser alagado.

O estudo do polígono de equilíbrio da versão V2A  mostra que as demais versões não têm o fator estabilidade submersa como limitante, mas a estabilidade submersa deve ser verificada quando do projeto mais detalhado dessas embarcações.

5.26 COMPORTAMENTO NO MAR (V2A)

O estudo do comportamento relaciona-se fundamentalmente a três questões: ao conforto da tripulação; aos limites de segurança (TAKIMOTO e OLIVEIRA, 1999) e de verificação final dos esforços estruturais; como limitador da operação de determinados equipamentos.

Muitas das operações realizadas por navios de guerra, como a transferência de carga leve, reboque de embarcações, abastecimento no mar, pouso de aeronaves, trânsito, guerra anti-submarino, etc dependem do conhecimento dos valores das amplitudes de acelerações e de movimentos experimentados pelo navio. A Tabela 95 relaciona movimentos e acelerações aos efeitos na funcionalidade do navio.

Raramente os limites relativos ao comportamento do navio no mar implicam alguma alteração conceitual profunda no projeto. As modificações que provocam são, quase sempre, marginais. (RODRIGUES et al., 1998).

É muito comum, após o estudo do comportamento no mar, a introdução da bolina, com o intuito de diminuir o movimento de jogo (*roll*), e este apêndice interfere pouco com os demais aspectos do projeto, desde que disposta ao longo de uma linha de corrente, de maneira a minimizar sua influência na resistência ao avanço.

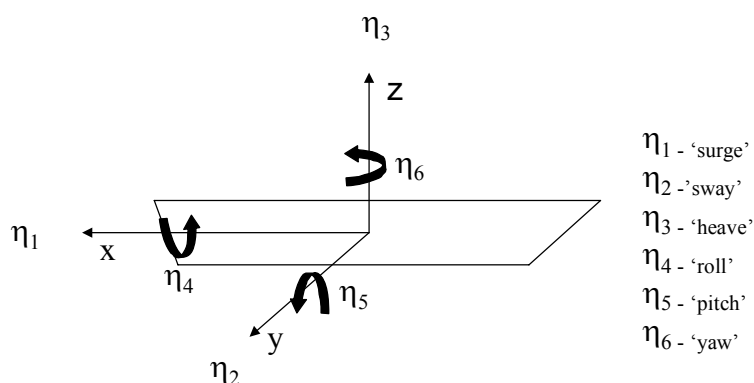


Figura 115- Graus de liberdade do movimento do navio.

O estudo de comportamento no mar considera o navio como um corpo rígido sob a ação de forças externas, com pequenos movimentos (vibrações) em seis graus de liberdade: três de translação, horizontal ou movimento para vante (*surge*), deriva

(sway), arfagem (*heave*), três de rotação, balanço ou jogo (*roll*), caturro, (*pitch*) e cabeceio (*yaw*).

A teoria ora utilizada é estritamente linear e assume que o navio possui pequenos deslocamentos a partir de sua posição de equilíbrio e ambas as ondas incidentes como também as ondas geradas pelo navio possuem pequenas amplitudes. O efeito da não-linearidade é introduzido apenas a partir de considerações do espectro de mar.

A água do mar é um fluido newtoniano com todos os efeitos de amortecimento viscosos em relação ao movimento de roll desprezados.

O navio é tido como esbelto, ou seja, seu comprimento muito superior a sua boca e calado, desta forma, podendo-se considerar cada seção do navio como bi-dimensional. Levando-se este fato em consideração pode-se aplicar a teoria das faixas sem qualquer interferência entre faixas adjacentes.

A validade dessa hipótese é questionável, entretanto, mas a teoria de faixas tem sido aplicada nos limites de $L/B \sim 3$, bem inferiores ao do híbrido, $L/B \sim 5$.

Aplicando-se a equação de Newton ao sistema navio tem-se algo da forma:

$$\sum_{k=1}^6 \left[(M_{jk} + A_{jk}) \cdot \ddot{\eta}_k + B_{jk} \cdot \dot{\eta}_k + C_{jk} \cdot \eta_k \right] = F_j \cdot e^{i\omega_e t}; j = 1..6 \quad (121)$$

Na equação anterior, M_{jk} representa a matriz da massa generalizada do navio, B_{jk} e C_{jk} são respectivamente a matriz da massa adicional e a matriz dos coeficientes de amortecimento, C_{jk} representa os coeficientes de restauração hidrostática, e F_j representa as amplitudes das forças referentes aos movimentos de ‘surge’, ‘sway’, ‘heave’, e as amplitudes dos momentos referentes aos movimentos de ‘roll’, ‘pitch’, e ‘yaw’.

Para navios com simetria lateral, ou seja, em relação a linha de centro e que o centro de gravidade está localizado na posição $(0,0,Z_g)$, a matriz da massa generalizada pode ser escrita como mostra a equação 122. Nesta equação considera-se M a massa do navio, I_j o momento de inércia no j -ésimo modo, e I_{jk} é o produto de inércia. Os termos de inércia são calculados em relação ao sistema de coordenadas mostrado na Figura 115. O único produto de inércia que aparece é o I_{46} , que é o produto referente a interação entre os movimentos de ‘roll-yaw’ que desaparece se o navio possuir simetria em torno do eixo transversal e é muito pequeno quando o navio não a possui.

$$M_{jk} = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 & 0 & M_{zg} & 0 \\ 0 & M & 0 & M_{zg} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & M & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_{zg} & 0 & I_4 & 0 & I_{46} \\ M_{zg} & 0 & 0 & 0 & I_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{46} & 0 & I_6 \end{bmatrix} \quad (122)$$

Para navios os únicos coeficientes lineares de restauração hidrostática são C_{33} , C_{44} , C_{55} , C_{35} , e C_{53} . Se houver simetria lateral, os coeficientes da massa adicional e os coeficientes de amortecimento são representados pelas matrizes A_{jk} e B_{jk} :

$$A_{jk} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & A_{13} & 0 & A_{15} & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 & A_{24} & 0 & A_{26} \\ A_{31} & 0 & A_{33} & 0 & A_{35} & 0 \\ 0 & A_{42} & 0 & A_{44} & 0 & A_{46} \\ A_{51} & 0 & A_{53} & 0 & A_{55} & 0 \\ 0 & A_{62} & 0 & A_{64} & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \quad (123)$$

$$B_{jk} = \begin{bmatrix} B_{11} & 0 & B_{13} & 0 & B_{15} & 0 \\ 0 & B_{22} & 0 & B_{24} & 0 & B_{26} \\ B_{31} & 0 & B_{33} & 0 & B_{35} & 0 \\ 0 & B_{42} & 0 & B_{44} & 0 & B_{46} \\ B_{51} & 0 & B_{53} & 0 & B_{55} & 0 \\ 0 & B_{62} & 0 & B_{64} & 0 & B_{66} \end{bmatrix} \quad (124)$$

A equação 121 é análoga a um sistema massa mola amortecedor, diferindo entretanto, porque os coeficientes da equação não são constantes, mas dependentes da frequência. O tratamento é, porém, análogo. Descobre-se a função de transferência do navio para ondas senoidais e, então, se aplica o espectro do mar irregular sobre o quadrado dessa função (RAO – *response amplitude operator*, (LLOYD, 1998)).

O espectro do mar (ou densidade espectral) pode ser entendido como uma função que associa a cada frequência uma energia. Dessa forma, a função de transferência necessariamente tem como entrada um parâmetro de frequência.

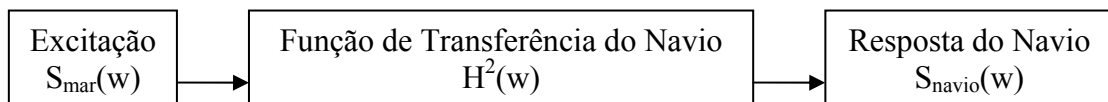


Figura 116- Solução do navio para mar irregular

Opta-se pela solução no domínio da frequência porque o problema é de natureza aleatória, como o mar. O domínio do tempo oferece também o problema da soma de ondas com fases diferentes.

5.26.1 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO NAVIO

As conclusões válidas para um sistema linear, massa-mola-amortecedor, são qualitativamente válidas para o caso de um navio, principalmente quando não se considera o acoplamento entre os movimentos. Assim pode-se inferir uma função de transferência FT^7 , como abaixo, que relaciona a frequência excitadora à resposta do sistema.

$$FT = \frac{e^{i\omega t}}{-m\omega^2 + i\omega b + c} \quad (125)$$

onde FT função de transferência de um sistema linear massa, m, mola, c, amortecedor, b.

Um navio avançando através de ondas regulares senoidais não vai responder na frequência da onda propriamente dita e, sim, na frequência de encontro como mostra a equação 126, onde V é a velocidade de avanço do navio, μ é o ângulo de proa do navio definido na Figura 115, ω é a frequência da onda definida na equação 127, g é a aceleração da gravidade, e λ é o comprimento da onda.

$$\omega_e = \omega - \frac{\omega^2 \cdot V}{g} \cdot \cos \mu \quad (126)$$

onde ω Frequência da onda incidente, ω_e Frequência de encontro

$$\omega = \sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda}} \quad (127)$$

que representa a relação entre frequência angular e comprimento de onda.

5.26.2 EXCITAÇÃO

Uma onda do mar pode ser definida como uma função que relaciona uma amplitude na vertical, ζ , a cada ponto do mar, (x,y) no instante de tempo, t.

$$\zeta(x,t) = f(x,y,t) \quad (128)$$

⁷ No caso do navio os coeficientes de amortecimento, massa adicional são dependentes da frequência.

Uma onda harmônica pode ser caracterizada por uma amplitude η por uma amplitude e uma frequência. Para um trem de onda, pode-se escrever, em série de *Fourier*:

$$\zeta(t) = \sum_1^{\infty} A_j e^{i(\omega_j t - \delta_j)} \quad (129)$$

onde j é o índice do harmônico j -ésimo, A_j é a média de amplitude nesta frequência, ω_j é a frequência j -ésima desta onda, δ_j é a fase

Por superposição de efeitos para um eixo qualquer η teremos, onde η é a amplitude do movimento do navio neste eixo:

$$\eta_k(t) = \sum_1^{\infty} A_j H_k(\omega_j) e^{i(\omega_j t - \delta_j)} \quad (130)$$

onde $H_k(\omega)$ é a função de transferência do navio no grau de liberdade k

Considerando-se um como uma função determinística tem uma entrada probabilística. Definindo a densidade de energia para o mar irregular, $S(\omega)$ como :

$$S(\omega) = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \frac{1}{2\Delta\omega} A_j^2 \quad (131)$$

Na equação anterior, $\Delta\omega$ é uma faixa de variação de frequências, ou seja, o mar associa para ondas nas frequências $\Delta\omega = \omega_i - \omega_\lambda$ uma energia S . Assim:

$$S(\omega_j) \Delta\omega = \frac{1}{2} A_j^2 \quad (132)$$

Definindo o momento m_r como:

$$m_r = \int \omega^r S(\omega) d\omega \quad (133)$$

A frequência média do mar é ω_m :

$$\omega_m = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}} \quad (134)$$

As amplitudes A_j dependem do mar. Para caracterizar o mar, sempre aleatório adotaram-se funções espectrais que procuram representar essa irregularidade. Apresenta-se o espectro de Pierson-Moskowitz, uma dessas funções e aqui anotada:

$$S(\omega) = \frac{A}{4} \cdot H_{1/3}^2 \cdot \frac{\omega_0^4}{\omega^5} \cdot \exp \left[-A \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^{-4} \right] \quad (135)$$

onde - $A = 1.25$, ω_0 é a frequência de pico e $H_{1/3}$ altura significativa. A relação entre a frequência média e de pico é por sua vez:

$$\omega_o = 0.772 \omega_m \quad (136)$$

Traça-se um perfil do comportamento em ondas da embarcação na análise de três mares:

Tabela 93 - Mares aplicados ao híbrido, apud Savitsky e Koelbel (1993)

Estado de Mar	Altura Significativa da Onda $H_{1/3}$ (m)	Período Modal da Onda (s)
3	1.4	5.9
4	2.1	7.2
7	4.0	11.4

A exemplo dos navios patrulhas de Rudko (2003), a embarcação híbrida tem um perfil de operação que deve atender pelo menos mar 4. O estudo do mar 7 serve apenas para verificar a fronteira do atendimento. Espera-se que o híbrido tenha um bom desempenho no mar, assim como os antigos submarinos de esquadra, em razão de suas formas mais pesadas.

5.26.3 ESPECTRO DE RESPOSTA

Definida a densidade espectral do mar, parte-se para a resposta do navio com o auxílio da a função de transferência do navio ao quadrado do navio (RAO):

$$S(\omega)_{navio} = H(\omega)^2 S(\omega) \quad (137)$$

5.26.4 SOLUÇÃO DO PROBLEMA

O conjunto de equações que resolve o comportamento no mar da embarcação foi resolvido pelo programa SMDENO de autoria do professor Sphaier, com a utilização da teoria das faixas. Os coeficientes A_{jk} , B_{jk} e C_{jk} foram obtidos a da integração das formas bidimensionais de Lewis em que os dois primeiros sofrem a correção para as frequências de encontro.

5.26.5 PREPARO DOS DADOS

O programa solicita dados como o raio de giração em roll, estimado $0.36B$, e em pitch, estimado $0.25L$ com base no *Recommended ...*(2001) que apresenta uma tabela de valores para navios e submarinos atuais.

Além disso, pede as áreas das balizas, obtidas através das curvas de Bonjean, o deslocamento e as frequências de onda e os ventos.

5.26.6 CRITÉRIOS DE DESEMPENHO E RESULTADOS

Há vários critérios de desempenho aos quais os navios têm sido submetidos, relacionados, cada um a um, a certo subsistema do navio. A Tabela 95 extrato fiel de Lewis (1989), apresenta o relacionamento entre os critérios, os elementos de projeto afetados e as falhas (degradações no desempenho).

Com o uso da Tabela 94, pode-se ver que o híbrido deve atender às condições estabelecidas por Comstock, Bales e Keane (1980), em valores rms, derivadas para cascos navais de superfície que não operem helicóptero:

Tabela 94 - Limites aceitáveis

I	Local	Item	Máx. aceitável	Mar 3	Mar 4	Mar 7
1		roll	4°			
2		pitch	3°	Atende	Atende	Atende
4	PPAV	aceleração vertical	0.2g	Atende	Atende	Atende
4	Comando	aceleração vertical	0.2g	Atende	Atende	Reprovado
5		aceleração lateral				
8		Freq. Slamming	20/h			
10		Deck Wetness	30/h			

Tabela 95 – Critérios de desempenho no comportamento em ondas (LEWIS, 1989). A coluna I relaciona-se à coluna I da Tabela 94

I	Critério de Desempenho	Elemento Afetado	Consequências Danosas
1	Roll	Sistemas afetos à missão, à tripulação e ao casco	Ferimentos, eficiência pessoal reduzida, degradação do casco e da missão
2	Pitch	Sistemas afetos à missão, à tripulação e ao casco	Ferimentos, eficiência pessoal reduzida, degradação do casco e da missão
3	Heave	Sistemas afetos à missão e conforto tripulação	Ferimentos no pessoal que opera com aeronaves. Incapacidade de operar com aeronaves
4	Aceleração vertical	Sistemas afetos à missão e conforto tripulação	Fadiga humana, eficiência pessoal reduzida, degradação dos sistemas relacionados à missão
5	Aceleração horizontal	Sistemas afetos à missão e conforto tripulação	eficiência reduzida do pessoal
6	Motion Sickness Incidence (MSI)	Conforto da tripulação	Fadiga humana, eficiência pessoal reduzida.. Impossibilidade de operar com o sonar
7	Aceleração de Slamming (batida ou culapada de proa)	Sistemas afetos à missão, à tripulação e ao casco	Avaria nos sistemas de mastros e fadiga estrutural
8	Frequência de Slamming	Sistemas afetos à missão e ao casco	Avaria estrutural do fundo do navio na proa
9	Frequência de emersão do sonar	Sistemas afetos à missão	Eficiência reduzida do sonar
10	Frequência de imersão do convés (deck wetness)	Sistemas afetos à tripulação	Ferimentos ou quedas da tripulação no mar. Avaria nos equipamentos do convés
11	Probabilidade de emersão do propulsor	Sistemas afetos ao casco	Avaria na propulsão
12	Velocidade da aeronave, relativa ao convés de pouso (convôo)	Sistemas afetos à missão	Avaria nos trens de pouso das aeronaves

6 MANOBRA

O propósito desse tópico é ter-se uma noção das características manobreadas da embarcação, versão V2A **III**. Apresentam-se, também, argumentos racionais que poderão constituir critérios razoáveis de manobra.

Procura-se dar um mesmo tratamento à manobra na condição de superfície e submersa, o que significa a utilização de um mesmo equacionamento para ambas as condições, ou seja, significa promover uma homogeneização desse tratamento.

Em ambos os casos há um desacoplamento dos movimentos do híbrido em um plano coincidente com seu plano central longitudinal, dito, plano vertical e outro perpendicular ao seu plano central longitudinal, dito, plano horizontal. Este fato facilita a homogeneização.

Da homogeneização resulta que a diferença entre o tratamento da manobra horizontal submersa e horizontal na superfície leva à diferença no cálculo das derivadas hidrodinâmicas.

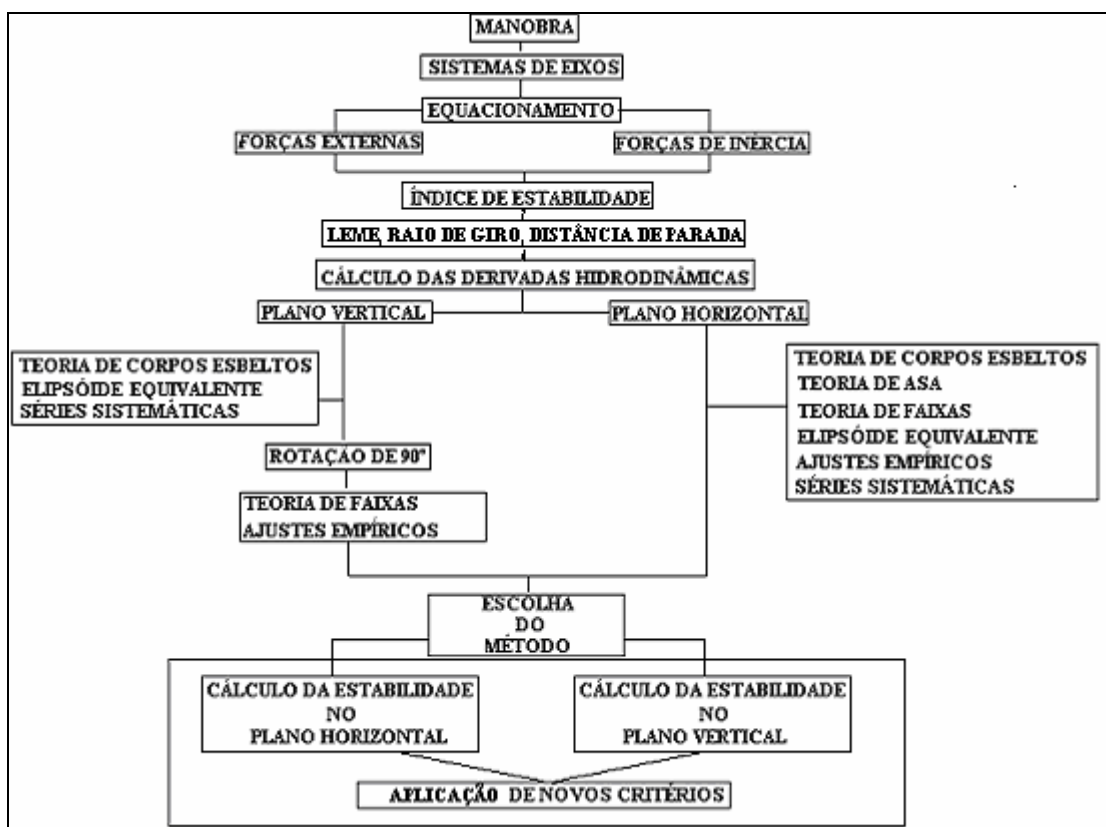


Figura 117 – Fluxograma de Manobra

O fluxograma da Figura 117 indica as atividades que se processam nesse tópico. A abordagem metodológica do problema, é, primeiramente, fazer-se o

desenvolvimento do modelo matemático do movimento, em que se propõem métodos de cálculo das forças envolvidas na manobra (momento, derivadas hidrodinâmicas).

O item 6.1 aborda o sistema de eixos utilizado, o relacionamento desse sistema de eixos a partir de ângulos de Euler e a formulação de uma matriz de inércia com relação a esses eixos, o que se pode entender como tarefas preliminares no desenvolvimento do problema. O item 6.2 apresenta as forças de inércia. O item 6.3 aborda a simplificação das forças externas, sob a hipótese de desacoplamento, preparando o conjunto de equações de onde se pode obter o índice de estabilidade (para os planos horizontal e vertical, item 6.4). Apresentam-se, em seguida, o efeito, de acordo com a literatura tradicional (LEWIS., 1989), que lemes fixos (ou rabetas) causam nas derivadas lineares, capazes de modificar o índice de estabilidade, 6.5.

A seguir, apresentam-se o diâmetro táctico, afastamento e avanço e seu relacionamento empírico com o raio de giro obtido do equacionamento linear em regime permanente, da forma como tradicionalmente se apresenta na literatura, item 6.6. O item 6.7 apresenta uma formulação analítica especialmente desenvolvida nesse trabalho para distância de parada procurando atender às peculiaridades do projeto. Distância de parada, raio de giro, diâmetro táctico e afastamento são medidas relacionadas ao critério de manobra proposto, e, por isso, se apresentam como de interesse nesse trabalho.

Os itens 6.10 a 6.19 tratam dos cálculos de derivadas hidrodinâmicas. Abordam as hipóteses subjacentes, e apresentam formulações para a obtenção dessas derivadas no plano horizontal e vertical. Esses itens apresentam discussões sobre a proposta de rotação de 90° do casco em torno de um eixo que passe pelo corpo no sentido longitudinal.

É fundamental notar a relevância dessas formulações. Tratam-se de adaptações que se fazem a formulações analítico-empíricas que existem na literatura, mas que como aqui apresentadas representam um método de cálculo novo, ou melhor, que adapta a literatura tradicional existente à demanda por estimativas de derivadas hidrodinâmicas na condição submersa.

O item 6.10 aborda outro problema relevante: a falta de simetria com relação a um plano horizontal perpendicular ao plano central longitudinal. O resultado que se obtém com a aplicação do método da malha de vórtices constitui um importante resultado para o projeto.

Finalmente, tem-se a formulação de novos critérios e testes, itens 6.20 e 6.21, o que é totalmente independente das demais atividades, mas se enriquece do processo de

cálculo que se desenvolve nos itens precedentes. O item 6.22 apresenta os resultados dessa fase de projeto para a versão V2A . Esse item ainda apresenta a confirmação da hipótese aventada no item 6.7 acerca da composição do coeficiente de resistência total.

6.1 PRELIMINARES

6.1.1 SISTEMAS DE EIXOS

O número de graus de liberdade é o número mínimo de coordenadas para determinar completamente a posição de todas as partes do sistema em qualquer instante de tempo. Dessa forma, tem-se que, tanto para navios quanto para submarinos, esse número é 6, sendo esses graus de liberdade apresentados na Figura 118.

Nesse trabalho, utilizam-se dois sistemas de coordenadas: um inercial e outro fixo no corpo. A origem do sistema fixo no corpo é o centro geométrico da embarcação, o eixo x é positivo para proa, z , para baixo. Esses eixos estão contidos no plano de simetria longitudinal e são paralelos aos eixos principais de inércia da embarcação. O eixo y é perpendicular a ambos, positivo a boreste. O paralelismo com os eixos principais de inércia permite que os momentos e produtos de inércia permaneçam constantes simplificando os cálculos.

As rotações são ditas: roll (balanço, rotação própria), rotação em x (ϕ); pitch (caturro, natação), rotação em y (θ); e rotação em z , yaw (cabeceio, guinada ou precessão) (ψ). As velocidades angulares, p , q e r . Apesar de designarem os mesmos escalares, os termos não são empregados no mesmo sentido, assim: rumo (*course*) refere-se a um valor grande e cabeceio, guinada ou precessão, a desvios desse valor.

As translações chamam-se avanço (*surge*), movimento em x , deriva ou afastamento (*sway*), movimento em y e arfagem (*heave*), movimento em z . Analogamente às rotações, no lugar de deriva, emprega-se afastamento, quando pequeno.

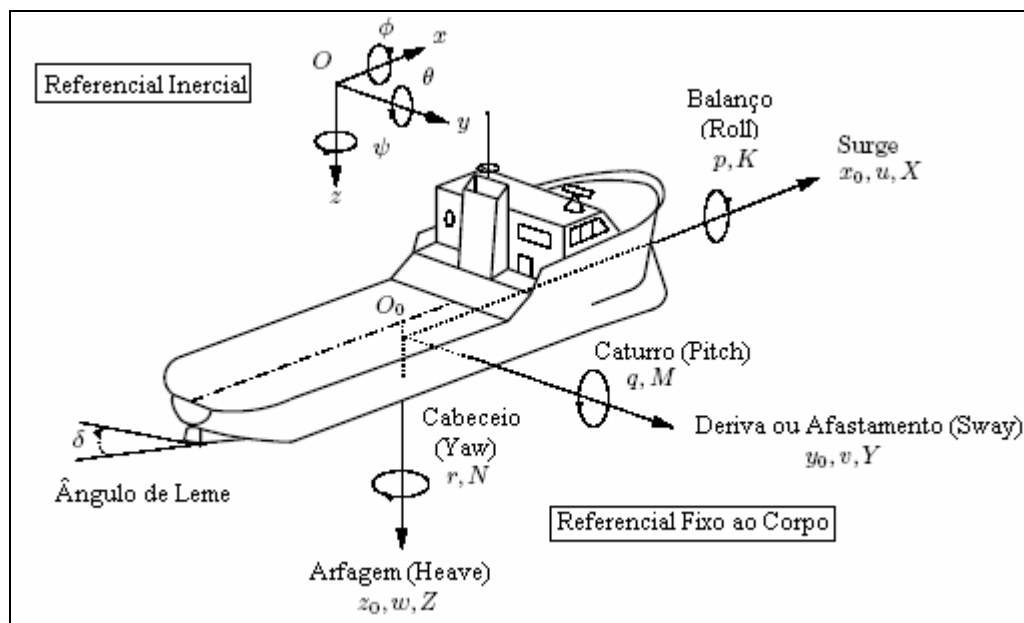


Figura 118- Graus de liberdade de um navio (Nomenclature..., 1950 apud PÉREZ E BLANKE, 1998)

Na manobra de navios, os movimentos do plano perpendicular à linha d'água são desprezados, por sua pequeníssima amplitude (arfagem e caturro). Esses movimentos podem ser considerados como vibrações em torno de uma posição de equilíbrio. A Figura 119 apresenta os graus de liberdade restantes que definem o movimento do navio: rotação em z e translações em x e y.

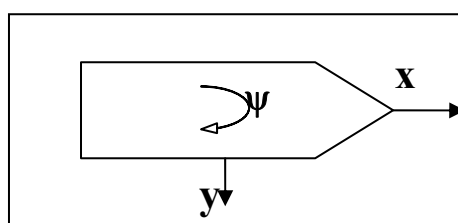


Figura 119 – Graus de liberdade de um navio com o desprezo dos movimentos de pequena amplitude

Não se pode fazer o desprezo dos movimentos verticais no caso de um corpo submerso, por exemplo, um submersível. Portanto a liberdade de movimento de um submarino é um caso geral da liberdade de um navio.

A abordagem tradicional da manobrabilidade de veículos submersos é considerar-se que a manobra se passa em dois planos independentemente: horizontal e vertical (que contém o plano central longitudinal vertical do navio). Tal abordagem é possível em razão do fraco acoplamento entre os graus de liberdade nesses planos, nas equações linearizadas.

Dessa forma o tratamento do problema do corpo submerso passa ser o tratamento de dois problemas independentes: o movimento no plano vertical, Figura 120 e o movimento no plano horizontal, Figura 121, idêntico ao do navio, Figura 119.

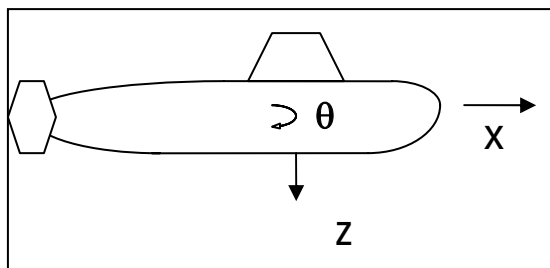


Figura 120 - Graus de liberdade de um submarino, velocidades nas direções dos graus de liberdade

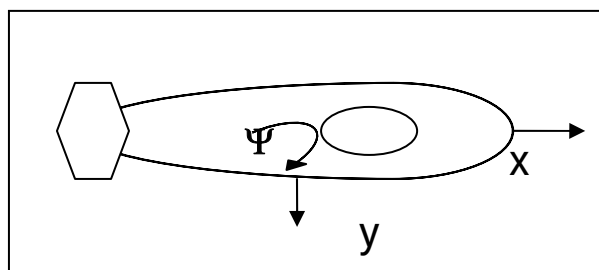


Figura 121 – Submarino, plano horizontal, visto de cima

6.1.2 VELOCIDADES, FORÇAS, MOMENTOS

A cada grau de liberdade está associada uma velocidade. Dessa forma, tem-se: u , v e w , respectivamente as componentes da velocidade associadas aos eixos locais x , y e z , como aparece na Figura 118. Analogamente, a mesma figura apresenta p , q , r como as velocidades angulares referentes a esses mesmos eixos.

As forças externas aplicadas no corpo têm componentes X , Y e Z , respectivamente nas direções x , y e z (Figura 118). Os momentos K , M e N , são também referentes a cada um desses eixos, na sequência x , y e z (Figura 118).

6.1.3 ÂNGULOS DE EULER

Apesar da existência de outras abordagens mais sofisticadas, como, por exemplo, a utilização de quaternions, aqui, como em Neves (2003), e seguindo a tendência apresentada em Jackson (1992), utilizam-se referenciais girantes relacionados por ângulos de Euler aos referenciais inerciais.

Assim, estabelecem-se dois referenciais um móvel e outro girante, fixo à embarcação no ponto C , não necessariamente em seu centro de gravidade, com os eixos principais de inércia coincidentes com os eixos girantes e a eles fixamente rígidos, como na Figura 122. Nessa figura G é o centro de gravidade e r_G seu raio vetor a partir de C .

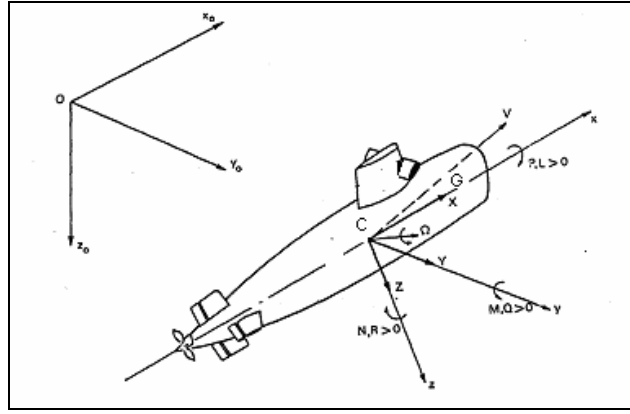


Figura 122 – Imagem adaptada de Crepel (1989)

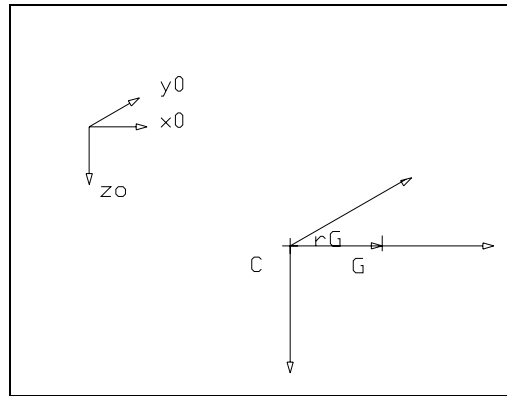


Figura 123 – Raio vetor r_G no referencial móvel

Os eixos girantes trazem o inconveniente de trabalhar com quantidades que não são vetores: as rotações finitas. Vetores são invariantes sob mudanças de coordenadas, ou seja, seu módulo, direção e sentido permanecem os mesmos se os referenciais a que se ligam girarem, variando, entretanto, as suas projeções (componentes) nos eixos Cx , Cy e Cz desses sistemas. Isso é bem conhecido em física, porque significa que um fenômeno deve ser o mesmo se observado de qualquer lugar.

Já as rotações finitas dependem de uma seqüência determinada de rotações em torno dos eixos x , y , z , de modo a conservarem suas direções. Assim, adota-se a seqüência de rotações em torno dos eixos z , y e x . Seja um vetor qualquer U nas componentes do sistema girante $Cx_1y_1z_1$, $U = U_1 i_1 + V_1 j_1 + W_1 k_1$, após uma rotação ψ em z , no novo sistema $Cx_2y_2z_2$, tem-se:

$$\begin{bmatrix} U_2 \\ V_2 \\ W_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ V_1 \\ W_1 \end{bmatrix} = T_3(\Psi) \begin{bmatrix} U_1 \\ V_1 \\ W_1 \end{bmatrix} \quad (138)$$

onde U_2, V_2, W_2 são as componentes do Vetor no sistema 2. Girando agora Θ em y , :

$$\begin{bmatrix} U_3 \\ V_3 \\ W_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_2 \\ V_2 \\ W_2 \end{bmatrix} = T_2(\theta) \begin{bmatrix} U_2 \\ V_2 \\ W_2 \end{bmatrix} \quad (139)$$

Finalmente carregando-se agora o sistema 3 para o sistema 4, girando de ϕ em x:

$$\begin{bmatrix} U_4 \\ V_4 \\ W_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & -\sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_3 \\ V_3 \\ W_3 \end{bmatrix} = T_3(\phi) \begin{bmatrix} U_3 \\ V_3 \\ W_3 \end{bmatrix} \quad (140)$$

Aplicando sucessivamente $T_1(\psi)T_2(\theta)T_3(\phi)$ ao vetor (U_1, V_1, W_1) pode-se levá-lo ao vetor (U_4, V_4, W_4) , assim:

$$\begin{bmatrix} U_4 \\ V_4 \\ W_4 \end{bmatrix} = T_1(\psi)T_2(\theta)T_3(\phi) \begin{bmatrix} U_1 \\ V_1 \\ W_1 \end{bmatrix} \quad (141)$$

No caso particular do vetor velocidade angular, na forma de componentes cartesianas:

$$\vec{\Omega} = p.i + q.j + r.k \quad (142)$$

tem-se:

$$p = -\sin\theta.\dot{\psi} + \dot{\phi} \quad (143)$$

$$q = \cos\theta.\sin\phi.\dot{\psi} + \cos\phi.\dot{\theta} \quad (144)$$

$$r = \cos\theta.\cos\phi.\dot{\psi} - \sin\phi.\dot{\theta} \quad (145)$$

6.1.4 MATRIZ DE INÉRCIA

Seja um corpo rígido formado de um conjunto de pontos materiais de massa m_i e x_i , y_i e z_i as coordenadas desses pontos com relação à origem C no próprio corpo. Definem-se o momento de inércia com relação a esse corpo como:

$$I_{zz} = \sum m_i (x_i^2 + y_i^2) \quad (146)$$

$$I_{yy} = \sum m_i (z_i^2 + x_i^2) \quad (147)$$

$$I_{xx} = \sum m_i (z_i^2 + y_i^2) \quad (148)$$

e os produtos de inércia como

$$I_{xy} = \sum m_i x_i y_i \quad (149)$$

$$I_{xz} = \sum m_i x_i z_i \quad (150)$$

$$I_{yz} = \sum m_i y_i z_i \quad (151)$$

Da definição percebe-se que $I_{xy} = I_{yx}$. Esses produtos e momentos de inércia compõem a matriz de inércia da forma:

$$I = \begin{bmatrix} I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (152)$$

6.1.5 DISCUSSÃO DAS HIPÓTESES DO EQUACIONAMENTO DO PROBLEMA DE MANOBRA

O equacionamento que se segue admite:

- (i) corpo rígido;
- (ii) possui um plano de simetria vertical longitudinal
- (iii) tem massa fixa, *a priori*;
- (iv) peso e empuxo equilibrados, para navios; flutuação neutra, para submarinos;
- (v) distribuição invariável da massa pelo corpo ao longo do tempo, *a priori*;
- (vi) seu centro de gravidade se encontra no plano de simetria, *a priori*;
- (vii) possui dois eixos principais de inércia nesse plano de simetria,

A hipótese de corpo rígido é verdadeira exceto quanto ao movimento das superfícies de controle (leme).

A massa e sua distribuição variam com o tempo, pois ambos navio e submarino têm essas grandezas dependentes do consumo de combustíveis, da circulação da tripulação, etc. Na escala de tempo considerada, entretanto, pode-se dizer que essas variações sejam desprezíveis.

O centro de gravidade deve, de fato, encontrar-se no plano de simetria, caso contrário o veículo apresentaria banda, o que não ocorre normalmente. A propósito, a distribuição de massas durante a construção se passa de modo a evitar a existência de banda. Os eixos principais de inércia estão normalmente nesse plano, em virtude desse fato.

Enquanto que, para navios e submarinos, a variação de massa com o tempo não tem relevância para a análise dinâmica de satélites ou foguetes é necessária cuidadosa avaliação dessa grandeza.

6.2 EQUACIONAMENTO DA MANOBRA

Tendo discutido as hipóteses, o sistema de eixos empregados na manobra, a nomenclatura associada às velocidades, forças externas e momentos, bem como as relações entre esses elementos, passa-se à discussão do próprio equacionamento do problema.

O equacionamento da manobra mostra que o problema em 6 graus de liberdade pode ser dividido em dois planos, horizontal e vertical, cada qual com 3 graus de liberdade. Nesse ponto, a manobra na superfície pode igualar-se à manobra na condição submersa, no plano horizontal, desde que assumidas hipóteses coerentes, como será verificado no item 6.3.

O procedimento de desacoplamento torna o equacionamento homogêneo, ou seja, faz com que o equacionamento se utilize de equações de mesma forma, embora com diferentes coeficientes para seus termos, em razão de que esses termos dependem de características geométricas que são diferentes em cada condição, submersa ou na superfície.

6.2.1 FORÇAS DE INÉRCIA LINEARIZADAS

O estudo de manobrabilidade das embarcações utiliza a teoria das perturbações em torno de um movimento de referência. O movimento de referência comumente adotado em manobra é o deslocamento paralelo à superfície da terra com velocidade U , dita velocidade principal.

Utiliza-se a notação U , para designar a velocidade do navio no sentido do eixo x (fixo ao corpo). As velocidades nos eixos y e z (também fixos ao corpo) são consideradas pequenas e designam-se por v e w . Designa-se por u , a perturbação da velocidade U , no sentido do eixo x . Tem-se, assim, que o vetor velocidade total do navio (V_{navio}), que corresponde à velocidade de seu centro de gravidade, é composta de:

$$V_{navio} = (U+u)\mathbf{i} + v\mathbf{j} + w\mathbf{k} \quad (153)$$

onde $O(U) \gg O(u) \sim O(v) \sim O(w)$, ou seja, a ordem de U é muito maior que a ordem de u que é da mesma ordem de v e w .

Em virtude da hipótese de pequenas amplitudes para a velocidade u , v e w , o produto de duas dessas velocidades pode ser desprezado, o que simplifica as forças e momentos de inércia nos apêndices (A e B):

$$X = m[\dot{u} + z_G \dot{q}] \quad (154)$$

$$Y = m[\dot{v} + Ur + x_G \dot{r}] \quad (155)$$

$$Z = m[\dot{w} - Uq - x_G \dot{q}] \quad (156)$$

$$K = I_{xx} \dot{p} - m z_G (\dot{v} + Ur) \quad (157)$$

$$M = I_{yy} \dot{q} + m [z_G \dot{u} - x_G (\dot{w} - qU)] \quad (158)$$

$$N = I_{zz} \dot{r} + m x_G (\dot{v} + Ur) \quad (159)$$

6.3 O DESACOPLAMENTO

A linearização tem como resultado o desacoplamento do sistema. Como se pode ver a componente das forças externas em y , Y , e dos momentos em y , N , podem ser resolvidos separadamente do restante do sistema.

Para o plano vertical, analogamente, fica-se com as demais equações para X , Z e M . Zerando os termos em du/dt , a equação da força em x desacopla-se do restante das equações. Isso permite escrever para o grau de liberdade z e θ :

$$Z = m[\dot{w} - Uq - x_G \dot{q}] \quad (160)$$

$$M = I_{yy} \dot{q} - m[x_G(\dot{w} - qU)] \quad (161)$$

E para os graus de liberdade x e ϕ , tem-se para as forças de inércia

$$X = m\dot{u} \quad (162)$$

$$K = I_{xx} \dot{p} \quad (163)$$

6.3.1 FORÇAS EXTERNAS

As forças externas ao híbrido são decorrentes de fatores ambientais, sustentação hidrostática, efeito do propulsor e das superfícies de controle. Além delas, encontram-se as forças hidrodinâmicas que surgem em razão do movimento do híbrido no meio fluido. Assim:

$$\sum F_{ext} = F_D + F_{St} + F_{propulsor} + F_{ambiente} + F_{lemes} \quad (164)$$

onde F_D é a força de origem hidrodinâmica; F_{St} é a força de origem hidrostática, numericamente igual ao peso, na direção Z (referencial inercial); $F_{propulsor}$ é a força hidrodinâmica do propulsor, $F_{ambiente}$ são as forças do ambiente; e F_{lemes} são as forças hidrodinâmicas das superfícies de controle (lemes e profundores).

Como a manobra de nosso interesse realiza-se em águas calmas e sem correntes, $F_{ambiente} = 0$.

No modelo em estudo desprezar-se-á a força do propulsor, $F_{propulsor}$. F_{St} é a força atuante na massa do navio e tem seu módulo igual a:

$$F_{St} = mg \quad (165)$$

As forças hidrodinâmicas F_D , são decorrentes do movimento do navio e dependem de sua geometria de forma complexa. Pode-se, genericamente, tentar-se representá-las através de:

$$F_D = f\left(\zeta, \frac{d}{dt}\zeta, \frac{d^2}{dt^2}\zeta\right) \quad (166)$$

onde f é uma função qualquer e ζ é um grau de liberdade do navio

Considerando o conjunto das forças externas restantes (F_D , F_{limes} e F_{st}) como funções não lineares posicionais dos graus de liberdade, de suas derivadas e das acelerações nesses graus, pode-se tentar linearizar o sistema a partir do emprego de séries de Taylor.

Expandindo-se as forças externas em série de Taylor, nas direções x , y e z aparecem expressões da forma a seguir (apresentada apenas na direção x):

$$X = X^e + \left(\frac{\partial X}{\partial x_o}\right)^e \Delta x_o + \left(\frac{\partial X}{\partial y_o}\right)^e \Delta y_o + \dots + \left(\frac{\partial X}{\partial u}\right)^e \Delta u + \left(\frac{\partial X}{\partial v_o}\right)^e \Delta v + \dots + \left(\frac{\partial X}{\partial \delta}\right)^e \Delta \delta + \left(\frac{\partial X}{\partial \dot{\delta}}\right)^e \Delta \dot{\delta} + \dots$$

onde δ é a deflexão em ângulo da superfície de controle considerada e o sobre-índice e , significa que os termos se referem à posição de equilíbrio (ponto estacionário).

No estudo da manobra de embarcações, estudam-se desvios com relação a um ponto de equilíbrio, dito estacionário.

No ponto estacionário da manobra, como já dito, o navio ou submarino têm um rumo paralelo à horizontal com velocidade constante U . Essa condição inicial supõe que todas as forças estão equilibradas, logo, os primeiros termos da série de Taylor em X, Y, Z, M, N, K devem ser zero, ou seja, o somatório das forças externas é zero (corpo com movimento uniforme):

$$X - X^e = Y - Y^e = Z - Z^e = M - M^e = N - N^e = K - K^e = 0 \quad (167)$$

Os demais termos da série de Taylor são chamados de derivadas hidrodinâmicas. São termos lineares se em monômios lineares, e não lineares nos demais casos.

Para escrever as forças externas X , Y e Z e os momentos K , M , N em função dessas derivadas hidrodinâmicas adota-se uma simbologia simplificada para a derivada de uma variável com respeito a outra. Assim, por simplicidade de escrita, para duas variáveis quaisquer τ e ξ , a derivada de τ com respeito a ξ é:

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \tau = \tau_\xi$$

Algumas derivadas hidrodinâmicas têm seus valores passíveis de serem apurados em função das hipóteses do modelo. Esse desenvolvimento poupa a escrita e é aqui efetuado de forma a simplificar o equacionamento posterior.

Todas as derivadas posicionais, com o corpo convenientemente mergulhado, devem ser nulas, pois o meio marinho é isotrópico, exceto no sentido vertical. Assim:

$$X_x = X_y = Y_x = Y_z = Z_x = Z_y = 0 \quad (168)$$

$$K_x = K_y = M_x = M_y = N_x = N_y = 0 \quad (169)$$

Cite-se o fato que derivadas posicionais não são nulas, por exemplo, em sistemas ancorados. Analogamente com respeito aos ângulos.

$$X_\phi = X_\psi = Y_\phi = Y_\psi = Z_\phi = Z_\psi = 0 \quad (170)$$

$$K_\psi = M_\phi = M_\psi = N_\phi = N_\psi = 0 \quad (171)$$

Para corpos submersos:

$$X_z = Y_z = K_z = N_z = 0 \quad (172)$$

Para submarinos desprezando-se o efeito da variação de volume com a profundidade:

$$Z_z = M_z = 0 \quad (173)$$

Para navios com linha d'água constante (efeito da variação de cota):

$$K_z = Y_z = Z_z = M_z = 0 \quad (174)$$

Para submarinos, o aumento da cota gera um aumento de pressão e diminuição do volume com a profundidade. Logo, se não houver equilíbrio, essas forças vão variar, pois resultam de diferenciais de pressão. Essa variação, entretanto, foi desprezada, pois se considera que a variação de cota é pequena e ainda haverá o equilíbrio.

Para navios de superfície, a cota varia e forças consideráveis de arfagem (*heave*) e caturro (*pitch*) aparecem, contudo em manobra, consideram-se águas calmas e o navio com trim estável, portanto sem variação de cota em relação à superfície.

Em razão de sua simetria com relação ao plano xz:

(i) aceleração a ré decorrente de força simétrica, X:

$$X_v = X_p = X_r = 0 \quad (175)$$

(ii) movimentos assimétricos

$$Z_v = Z_p = Z_r = 0 \quad (176)$$

$$M_v = M_p = M_r = 0 \quad (177)$$

$$Y_u = Y_w = Y_q = 0 \quad (178)$$

$$K_u = K_w = K_q = 0 \quad (179)$$

$$N_u = N_w = N_q = 0 \quad (180)$$

Se a proa for simétrica (X_θ será oriundo de movimento assimétrico):

$$X_\theta = 0 \quad (181)$$

Por hipótese, podem ser desprezados:

$$X_q \sim 0 \quad (182)$$

$$Y_p \sim 0 \quad (183)$$

$$N_p \sim 0 \quad (184)$$

$$K_v = K_r \sim 0 \quad (185)$$

$$Z_u = X_w \sim 0 \quad (186)$$

$$M_u \sim 0 \quad (187)$$

Seja submarino (navio) em equilíbrio estático, se houver simetria yz e peso=empuxo:

$$Y_\theta = Z_\theta = 0 \quad (188)$$

$$N_\theta = K_\theta = 0 \quad (189)$$

Se o submarino está em equilíbrio estático quando em repouso, não pode haver forças nele atuantes se modificada sua posição angular, entretanto surgem momentos. Assim o momento de restauração fica:

$$M = mg \overline{BG} \sin \theta$$

$$M_\theta = mg \overline{BG} = mgz_G \quad (190)$$

onde $\overline{BG}$ é a distância entre o centro de gravidade e o de empuxo (z_G). Note-se que a expressão já incorpora o efeito do desacoplamento.

Os demais coeficientes hidrodinâmicos não são de estimativa trivial. Para o cálculo dessas derivadas assumem-se três geometrias idealizadas (no plano horizontal):

6.3.2 EQUAÇÕES DO MOVIMENTO

Aplicadas as considerações de simetria e isotropia do meio marinho, restam na expressão das forças externas termos que podem se relacionar com as forças de inércia a partir da 2ª. Lei de Newton:

$$Y_v v + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_r r + Y_{\dot{r}} \dot{r} = m[\dot{v} + Ur + x_G \dot{r}] \quad (191)$$

$$Z_q q + Z_{\dot{q}} \dot{q} + Z_w w + Z_{\dot{w}} \dot{w} = m[\dot{w} - Uq - x_G \dot{q}] \quad (192)$$

$$M_w w + M_{\dot{w}} \dot{w} + M_q q + M_{\dot{q}} \dot{q} + M_\theta \theta = I_{yy} \dot{q} + m[z_G \dot{u} - x_G (\dot{w} - qU)] \quad (193)$$

$$N_r r + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_v v + N_{\dot{v}} \dot{v} = I_{zz} \dot{r} + mx_G (\dot{v} + Ur) \quad (194)$$

Na forma matricial, tem-se para o plano horizontal (4.115 de Fossen, 1994):

$$\begin{bmatrix} m - Y_{\dot{v}} & mx_G - Y_{\dot{r}} \\ mx_G - N_{\dot{v}} & I_{zz} - N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_v & -mU + Y_r \\ N_v & -mx_G U + N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Y_\delta \\ N_\delta \end{bmatrix} \delta \quad (195)$$

onde Y_δ e N_δ são as forças e momentos dos lemes.

Analogamente para o plano vertical (veja-se a eq. 4.127 de Fossen, 1994):.

$$\begin{bmatrix} m-Z_{\dot{w}} & -mX_G-Z_{\dot{q}} & 0 \\ -mX_G-M_{\dot{w}} & I_{yy}-M_{\dot{q}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_w & mU+Z_q & 0 \\ M_w & M_q-mX_GU-\Delta\overline{BG} & \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{\delta} \\ M_{\delta} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_b + \begin{bmatrix} Z_s \\ M_{\delta} \\ 0 \end{bmatrix} \delta_s \quad (196)$$

onde Y_{δ} e N_{δ} são as forças e momentos das superfícies de controle: na proa (índice b, *bow*) e na popa (índice s, *stern*)

A forma matricial, rearranjada a partir de Fossen (1994), inclui o efeito das superfícies de controle ao conjunto de equações apresentado.

6.4 ÍNDICE DE ESTABILIDADE

Nesse tópic, deduzem-se índices de estabilidade direcional. Como as equações na superfície e na condição submersa são as mesmas, obtém-se o mesmo índice de estabilidade para ambas as condições para o plano horizontal.

O plano vertical, entretanto, apresenta um índice diferente em razão do equacionamento incluir termos hidrostáticos de restauração.

6.4.1 ÍNDICE DE ESTABILIDADE HORIZONTAL

O estudo do sistema desacoplado acaba se transformando no estudo de um sistema de terceira ordem no plano vertical e segunda ordem no plano horizontal.

Tomando a forma matricial do sistema de equações do plano horizontal, mas sem o efeito dos lemes tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m - Y_v & mx_G - Y_r \\ mx_G - N_v & I_z - N_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} Y_v & -mU + Y_r \\ N_v & -mx_G U + N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} \quad (197)$$

e invertendo-se a primeira matriz do lado direito:

$$\begin{bmatrix} m - Y_v & mx_G - Y_r \\ mx_G - N_v & I_z - N_r \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{-(mx_G - Y_r)(mx_G - N_v) + (m - Y_v)(I_z - N_r)} \begin{bmatrix} (I_z - N_r) & -(mx_G - Y_r) \\ -(mx_G - N_v) & (m - Y_v) \end{bmatrix} \quad (198)$$

o sistema fica então:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \frac{1}{-(mx_G - Y_r)(mx_G - N_v) + (m - Y_v)(I_z - N_r)} \begin{bmatrix} (I_z - N_r) & -(mx_G - Y_r) \\ -(mx_G - N_v) & (m - Y_v) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_v & -mU + Y_r \\ N_v & -mx_G U + N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} \quad (199)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \frac{1}{-(mx_G - Y_r)(mx_G - N_v) + (m - Y_v)(I_z - N_r)} * \begin{bmatrix} (I_{zz} - N_r)Y_v - (mx_G - Y_r)N_v & (I_{zz} - N_r)(-mU + Y_r) - (mx_G - Y_r)(-mx_G U + N_r) \\ -(mx_G - N_v)Y_v + (m - Y_v)N_v & -(mx_G - N_v)(-mU + Y_r) + (m - Y_v)(-mx_G U + N_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} \quad (200)$$

Definindo, como em Triantafyllou e Hover (2004), as componentes A_{ij} (com $i, j=1, 2$):

$$A_{11} = \frac{(I_{zz} - N_r)Y_v + (Y_r - mx_G)N_v}{(m - Y_v)(I_{zz} - N_r) - (mx_G - Y_r)(mx_G - N_v)} \quad (201)$$

$$A_{12} = \frac{-(I_{zz} - N_r)(mU - Y_r) - (Y_r - mx_G)(mx_G U - N_r)}{(m - Y_v)(I_{zz} - N_r) - (mx_G - Y_r)(mx_G - N_v)} \quad (202)$$

$$A_{21} = \frac{(N_{\dot{v}} - mx_G)Y_v + (m - Y_{\dot{v}})N_v}{(m - Y_{\dot{v}})(I_{zz} - N_{\dot{r}}) - (mx_G - Y_{\dot{r}})(mx_G - N_{\dot{v}})} \quad (203)$$

$$A_{22} = \frac{-(N_{\dot{v}} - mx_G)(mU - Y_r) - (m - Y_{\dot{v}})(mx_G U - N_r)}{(m - Y_{\dot{v}})(I_{zz} - N_{\dot{r}}) - (mx_G - Y_{\dot{r}})(mx_G - N_{\dot{v}})} \quad (204)$$

tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} \quad (205)$$

que é um problema de autovalores, d onde se obtém o seguinte polinômio característico:

$$s^2 + (-A_{11} - A_{22})s + (A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21}) = 0 \quad (206)$$

Segundo o critério de Routh-Hurwitz, a estabilidade é atingida se:

$$-A_{11} - A_{22} > 0 \quad (207)$$

$$A_{11}A_{22} - A_{12}A_{21} > 0 \quad (208)$$

As considerações seguintes permitem obter-se o conhecido critério de estabilidade no plano horizontal (TRANTAFYLOU and HOVER, 2004):

- (i) x_G é muito pequeno;
- (ii) $\{Y_{\dot{r}}, N_{\dot{v}}, N_v, Y_r\}$ são muito pequenas;
- (iii) $Y_{\dot{v}} \sim m$
- (iv) $N_{\dot{r}} \sim I_{zz}$
- (v) Y_v , grande e negativo;
- (vi) N_r , grande e negativo.

Assim reduzindo os termos A_{ii} :

$$A_{11} = \frac{Y_v}{(m - Y_{\dot{v}})} < 0 \quad (209)$$

$$A_{22} = \frac{N_r}{(I_{zz} - N_{\dot{r}})} < 0 \quad (210)$$

Tem-se finalmente:

$$-A_{11} - A_{22} > 0, \text{ sempre}$$

Eliminando-se o denominador que é idêntico em todos os termos, a segunda condição reduz-se a (TRANTAFYLOU and HOVER, 2004):

$$(I_{zz} - N_{\dot{r}})Y_v(m - Y_{\dot{v}})(N_r - mU) - \\ - [(N_{\dot{v}} - mx_G)Y_v + (m - Y_{\dot{v}})N_v][(I_{zz} - N_{\dot{r}})(mU - Y_r) + (Y_{\dot{r}} - mx_G)(N_r - mx_G U)] > 0 \quad (211)$$

E tem-se finalmente o índice de estabilidade linear C:

$$C = Y_v(N_r - m x_G U) + N_v(mU - Y_r) \quad (212)$$

Adimensionalizado, C assume a forma:

$$C = Y_v' N_r' + N_v' (m' - Y_r') \quad (213)$$

6.4.2 ÍNDICE DE ESTABILIDADE NO PLANO VERTICAL

O procedimento de obtenção do índice de estabilidade no plano vertical será, primeiramente, obter-se o índice de estabilidade em altas velocidades e depois verificar quando esse índice se aplica.

6.4.3 ÍNDICE DE ESTABILIDADE EM ALTAS VELOCIDADES

Adotando o mesmo procedimento de Neves (2003) estuda-se o caso em que as derivadas hidrodinâmicas tornam-se mais significativas que o conjugado de restauração do modelo. Isso significa resolver um sistema do tipo (onde $\overline{\Delta BG}$ seja desprezível):

$$\begin{bmatrix} m - Z_{\dot{w}} & -m x_G - Z_{\dot{q}} \\ -m x_G - M_{\dot{w}} & I_y - M_{\dot{q}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_w & mU + Z_q \\ M_w & M_q - m x_G U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \end{bmatrix}$$

Com hipóteses análogas aos do plano horizontal. Assim:

- (i) x_G é muito pequeno;
- (ii) $\{Z_{\dot{q}}, M_{\dot{w}}, M_w, Z_q\}$ são muito pequenas;
- (iii) $Z_{\dot{w}} \sim m$;
- (iv) $M_{\dot{q}} \sim I_{yy}$;
- (v) Z_w , grande e negativo;
- (vi) M_q , grande e negativo.

Fazendo uma analogia à dedução precedente para o plano horizontal, o coeficiente de estabilidade do plano vertical (em altas velocidades) torna-se:

$$C_v = M_q Z_w - M_w (mU + Z_q) \quad (214)$$

6.4.4 VELOCIDADE CRÍTICA PARA A ESTABILIDADE

Questiona-se, então, em que momento o conjugado $\overline{\Delta BG}$ pode ser desprezado. Para responder a isso, rearranjam-se as equações gerais de manobra na forma de Neves (2003):

$$\begin{bmatrix} m - Z_{\dot{w}} & -m x_G - Z_{\dot{q}} \\ -m x_G - M_{\dot{w}} & I_y - M_{\dot{q}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_w & mU + Z_q \\ M_w & M_q - m x_G U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \overline{\Delta BG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \int w dt \\ \theta \end{bmatrix} \quad (215)$$

Crepel (1989) descobre a velocidade limite do índice de altas velocidades a partir de duas considerações: $M_{\dot{w}} = 0$ e $Z_{\dot{q}} = 0$. Essas considerações dão origem a um novo sistema:

$$\begin{bmatrix} m-Z_{\dot{w}} & 0 \\ 0 & I_y-M_{\dot{q}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_w & mU+Z_q \\ M_w & M_q-mx_GU \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \Delta \overline{BG} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \int w dt \\ \theta \end{bmatrix} \quad (216)$$

As massas adicionais desprezadas em Crepel (1989) são de fato muito pequenas, zero para corpos com simetria proa-popa. A solução, com tais simplificações, leva a um polinômio característico da forma:

$$a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3 = 0 \quad (217)$$

onde

$$a_3 = (-Z_w) \Delta \overline{BG} \quad (218)$$

$$a_2 = (m - Z_{\dot{w}}) \Delta \overline{BG} + C_v \quad (219)$$

$$a_1 = (m - Z_{\dot{w}})(-M_q) + (I_y - M_{\dot{q}})(-Z_w) \quad (220)$$

$$a_0 = (m - Z_{\dot{w}})(I_y - M_{\dot{q}}) \quad (221)$$

Note-se que C_v é o coeficiente de estabilidade para altas velocidades, aqui propositalmente inserido nessas constantes.

Aplicando-se o critério de Routh-Hurwitz para a estabilidade para esse sistema linear, devem ser satisfeitas as seguintes condições:

- (i) $a_0 > 0$;
- (ii) $a_1 > 0$;
- (iii) $a_3 > 0$;
- (iv) $a_2 > a_0 a_3 / a_1$;

O coeficiente a_0 significa a multiplicação de duas constantes positivas, da ordem da massa e do momento de inércia em y, donde é sempre positivo.

O coeficiente a_3 é a negativa do conjugado de restauração estático do submarino (positivo para submarinos estaticamente estáveis) multiplicado pela derivada Z_w , sempre negativa, donde também é sempre positivo.

O coeficiente a_1 significa a soma de dois monômios positivos, a multiplicação de constantes da ordem da massa, uma vez que Z_w e M_q são sempre negativas, donde esse coeficiente é sempre positivo.

A análise de condição restante $a_2 > a_0 a_3 / a_1$ não é trivial. Reescrevendo a_1 em função de a_0 :

$$a_1 = a_0 \left[\frac{(-M_q)}{(I_y - M_{\dot{q}})} + \frac{(-Z_w)}{(m - Z_{\dot{w}})} \right] \quad (222)$$

O produto $a_0 a_3/a_1$ passa a ser:

$$\frac{a_0 a_3}{a_1} = (-Z_w) \overline{\Delta BG} \left[\frac{(-M_q)}{(I_y - M_{\dot{q}})} + \frac{(-Z_w)}{(m - Z_{\dot{w}})} \right]^{-1} \quad (223)$$

Reescrevendo a condição $a_2 > a_0 a_3/a_1$ e colocando o termo $\overline{\Delta BG}$ em evidência:

$$\overline{\Delta BG} \left\{ (m - Z_{\dot{w}}) + Z_w \left[\frac{(-M_q)}{(I_y - M_{\dot{q}})} + \frac{(-Z_w)}{(m - Z_{\dot{w}})} \right]^{-1} \right\} + C_v > 0 \quad (224)$$

finalmente rearranjando de forma a separar as contribuições estáticas e dinâmicas:

$$C_v \left\{ (m - Z_{\dot{w}}) + Z_w \left[\frac{(-M_q)}{(I_y - M_{\dot{q}})} + \frac{(-Z_w)}{(m - Z_{\dot{w}})} \right]^{-1} \right\} + \overline{\Delta BG} > 0 \quad (225)$$

Um estudo sucinto de magnitudes permite perceber que o termo entre chaves é ligeiramente positivo. Percebe-se assim que o coeficiente C_v determina o sinal do produto desse termo. Assim quando C_v seja maior que zero, por toda a faixa de velocidades da embarcação ter-se-á uma contribuição entre os termos estáticos e dinâmicos para a estabilidade, ou seja, o submarino será sempre estável.

Quando C_v seja menor que zero, entretanto, haverá uma velocidade crítica acima da qual o submarino será instável. Assim, expandindo C_v em suas componentes, tal velocidade é:

$$U_{\text{critica}} < \frac{\overline{\Delta BG}}{m M_w} \left\{ (m - Z_{\dot{w}}) + Z_w \left[\frac{(-M_q)}{(I_y - M_{\dot{q}})} + \frac{(-Z_w)}{(m - Z_{\dot{w}})} \right]^{-1} \right\} + \frac{Z_w M_q}{m M_w} - \frac{Z_q}{m} \quad (226)$$

A expressão para U_{critica} pode ser avaliada numericamente e tem grande interesse, pois há submarinos que não são estáveis acima de certas velocidades (CREPEL, 1989).

6.5 INTRODUÇÃO DE LEMES E RABETAS

A introdução das rabetas ou lemes fixos tem a finalidade de fazer o navio estável ou diminuir a instabilidade do navio de forma que seja manobrável.

Não se vê razão de distinguir o efeito das rabetas na condição submersa ou na superfície.

No plano horizontal e, por analogia, no plano vertical, a introdução de rabetas modifica várias das derivadas hidrodinâmicas do navio. Aqui se apresentam seu efeito sobre as derivadas de velocidade (e, portanto, seu efeito no índice de estabilidade).

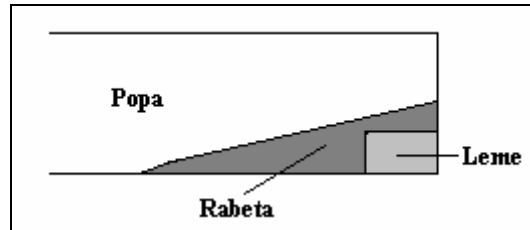


Figura 124 – Popa com leme e rabeta

Segundo o PNA (LEWIS,1989) quando leme e rabeta estão alinhados, como na Figura 124, deve-se calcular o conjunto rabeta e leme e depois se deve subtrair o efeito do leme. Assim as derivadas de velocidade são afetadas desse modo pela rabeta:

$$Y'_v = (Y'_v)_h + (Y'_v)_f - (Y'_v)_L \quad (227)$$

$$Y'_r = (Y'_r)_h - \frac{1}{2}(Y'_v)_f + \frac{1}{2}(Y'_v)_L \quad (228)$$

$$N'_v = (N'_v)_h - \frac{1}{2}(Y'_v)_f + \frac{1}{2}(Y'_v)_L \quad (229)$$

$$N'_r = (N'_r)_h + \frac{1}{4}(Y'_v)_f - \frac{1}{4}(Y'_v)_L \quad (230)$$

onde o subíndice h significa casco, e o subíndice f significa rabeta, L , significa o leme, apenas quando estiver alinhado no mesmo conjunto da rabeta, caso contrário $(Y'_v)_L = 0$.

Aqui se propõe que por analogia sejam aplicadas as mesmas relações no plano vertical.

$$Z'_w = (Z'_w)_h + (Z'_w)_f - (Z'_w)_L \quad (231)$$

$$Z'_q = (Z'_q)_h - \frac{1}{2}(Z'_w)_f + \frac{1}{2}(Z'_w)_L \quad (232)$$

$$M'_w = (M'_w)_h - \frac{1}{2}(Z'_w)_f + \frac{1}{2}(Z'_w)_L \quad (233)$$

$$M'_q = (M'_q)_h + \frac{1}{4}(Z'_w)_f - \frac{1}{4}(Z'_w)_L \quad (234)$$

apenas quando estiver alinhado no mesmo conjunto da rabeta, caso contrário $(Z'_w)_L = 0$.

Lembre-se que o efeito do leme deve ser retirado apenas quando ele fizer parte do conjunto da rabeta. Quando a rabeta estiver livre, as derivadas do leme devem entrar como zero nessa formulação.

6.6 RAO DE GIRO EM REGIME PERMANENTE NO PLANO HORIZONTAL

Para verificação da manobrabilidade do veículo (V2A ) , utiliza-se uma medida do diâmetro táctico, empiricamente relacionado ao raio de giro⁸. A teoria linear permite que se obtenha o raio de giro do navio em regime permanente, ou seja, o raio da circunferência descrita pelo navio (no plano horizontal) quando faz uma curva com velocidade constante, como melhor ilustrado na Figura 125.

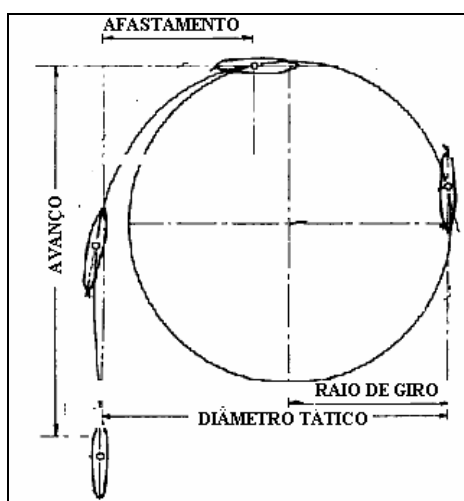


Figura 125 – Raio de Giro em Regime Permanente

O dobro do raio de giro não é sinônimo de diâmetro táctico, mas estão relacionados, empiricamente. O diâmetro táctico pode ser, independentemente, calculado pela teoria linear, maiores esclarecimentos podem ser encontrados no PNA, vol. 3, pp 347 (LEWIS, 1989).

Chamando de d_T o diâmetro táctico e de R_{giro} o raio de giro em regime permanente tem-se que (para navios de dois hélices):

$$d_T = L \left(0.14 + 2 \frac{R_{giro}}{L} \right) \quad (235)$$

Avanço (A_d) e afastamento (Tr), também ilustrados na Figura 125, aparecem no PNA, vol. 3, pp 347, a partir de dados empíricos para navios de dois hélices:

$$A_d = L \left(1.1 + 1.028 \frac{R_{giro}}{L} \right) \quad (236)$$

⁸ O diâmetro táctico pode ser independentemente calculado através da teoria linear

$$T_r = L \left(-0.357 + 1.062 \frac{R_{giro}}{L} \right) \quad (237)$$

Todas essas formulações empíricas carregam o problema de terem seus dados obtidos de navios que não satisfazem as formas do navio em estudo.

O raio de giro em regime permanente pode ser obtido de forma simples a partir do equacionamento já apresentado, bastando-se anular os termos de acelerações, assim:

$$\begin{bmatrix} Y_v & -mU + Y_r \\ N_v & -mx_G U + N_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_\delta \\ N_\delta \end{bmatrix} \delta \quad (238)$$

resolvendo o sistema de equações em r com a regra de Cramer tem-se:

$$r = \frac{\begin{vmatrix} Y_v & -Y_\delta \delta \\ N_v & -N_\delta \delta \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} Y_v & -mU + Y_r \\ N_v & -mx_G U + N_r \end{vmatrix}} = \frac{\begin{vmatrix} Y_v & -Y_\delta \delta \\ N_v & -N_\delta \delta \end{vmatrix}}{C} \quad (239)$$

onde C é o índice de estabilidade no plano horizontal, sendo dado por:

$$C = \begin{vmatrix} Y_v & -mU + Y_r \\ N_v & -mx_G U + N_r \end{vmatrix} \quad , \quad (240)$$

e, portanto, o raio de giro R_{giro} fica sendo:

$$R_{giro} = \frac{U}{r} = \frac{UC}{-\delta N_\delta Y_\delta} \quad (241)$$

6.7 DISTÂNCIA DE PARADA

Para a aplicação dos critérios de manobrabilidade adotados no trabalho, faz-se necessária uma estimativa da distância de parada.

Desenvolve-se, aqui, uma formulação simplificada para o cálculo da distância de parada, útil apenas no caso da versão V2A, apenas na condição de superfície. Não se tem interesse em verificar sua capacidade de parar na condição submersa, porque navega a pequenas velocidades.

Assim, desenvolve-se uma formulação que considera apenas a resistência ao avanço da embarcação. Como, *a priori*, a versão V2A tem hidrojetos acoplados a turbinas e esses dispositivos nem sempre são reversíveis, pensa-se ser esse um critério conservador, mas razoável. Aplicando-se a 2ª. Lei de Newton à versão V2A, tem-se:

$$\frac{1}{2} \rho L^2 T (-X'_{\dot{U}} + m') \dot{U} = -\frac{1}{2} \rho L T \left(\frac{S_m}{LT} \right) U^2 C_t \quad (242)$$

onde C_t é coeficiente de resistência total, da curva de resistência ao avanço. Lembrando que:

$$\dot{U} = U \frac{dU}{dX} \quad (243)$$

com isso fica-se:

$$L(-X'_{\dot{U}} + m') U \frac{dU}{dX} = -\left(\frac{S_m}{LT} \right) U^2 C_t \quad (244)$$

e em primeira aproximação:

$$C_t = U \frac{dC_t}{dU} + C_{t0} \quad (245)$$

reagrupando os termos e integrando:

$$\int_U^{U_f} \frac{dU}{U C_t} = -\int_0^{SD} \frac{\left(\frac{S_m}{LT} \right)}{L(-X'_{\dot{U}} + m')} dX \quad (246)$$

onde U_f é a velocidade de 100m/hora, ou seja, a ordem de grandeza de um navio de médio porte e um tempo considerado infinito (1h).

com isso fica-se:

$$SD = - \left[\frac{1}{C_{t0}} \left(\frac{L(-X'_{\dot{U}} + m')}{\left(\frac{S_m}{LT} \right)} \right) \left(\ln(u) - \ln \left(C_{t0} + u \frac{dC_t}{du} \right) \right) \right]_U^{U_f} \quad (247)$$

com a hipótese de que C_{t0} é o C_t correspondente a uma placa plana de Reynods 10^8 , o que é conservativo:

$$C_{t0} = \frac{0.075}{[\log(10^8) - 2]^2} \quad (248)$$

lembrando que

$$X'_{\dot{U}} \sim -0.08m \quad (249)$$

e considerando-se constante o valor de C_{t0} , tem-se finalmente:

$$\frac{SD}{L} = - \frac{1}{C_{t0}} \left(\frac{1.08m'}{\left(\frac{S_m}{LT} \right)} \right) \left(\ln \left(\frac{U_f}{U} \right) - \ln \left(\frac{C_{t0} + U_f \frac{dC_t}{du}}{C_{t0} + U \frac{dC_t}{du}} \right) \right) \quad (250)$$

Recomenda-se que se utilize o menor C_t dentre os fornecidos, para se tornar um critério conservador.

Percebe-se claramente que é mera aproximação local, entretanto o grau de precisão desejado não deve ficar afetado. O critério do híbrido está-se construindo.

6.8 ADIMENSIONALIZAÇÃO

Antes de prosseguir na obtenção das características de manobra é interessante esclarecer acerca da adimensionalização. Há 3 sistemas para adimensionalização que são sintetizados em Norrbin (1971), dois dos quais apresentados na Tabela 96.

O primeiro sistema adimensionaliza pelo produto LT , considerado uma área de referência. O segundo sistema adimensionaliza pelo produto L^2 .

Note-se que como o navio é considerado um corpo duplo na superfície a área $2LT$ é a área lateral da asa e não LT , o que faz com que o primeiro sistema, correntemente aceito, faça a área de referência da asa navio ser sempre a metade da área de referência dos demais fôlios, ou de outra forma, que sua razão de aspecto teórica dobre.

Adimensionalização consiste em dividir a força pela área de referência. A Tabela 96 apresenta esses resultados para a derivada Y_v .

Tabela 96 – Fatores de adimensionalização para as derivadas de velocidades e massa

ÁREA DE REFERÊNCIA (A_0)	Sistema 1* (LT)	Sistema 2** (L^2)
Y_v'	$\frac{1}{2}\rho U \cdot LT$	$\frac{1}{2}\rho U \cdot L^2$
Y_r	$\frac{1}{2}\rho U \cdot TL^2$	$\frac{1}{2}\rho U \cdot L^3$
N_v'	$\frac{1}{2}\rho U \cdot TL^2$	$\frac{1}{2}\rho U \cdot L^3$
N_r'	$\frac{1}{2}\rho U \cdot TL^3$	$\frac{1}{2}\rho U \cdot L^4$
m'	$\frac{1}{2}\rho \cdot TL^2$	$\frac{1}{2}\rho L^3$

* o fator de adimensionalização do Sistema 1 é extrato de Gueler (1983)

** o fator de adimensionalização do Sistema 2 é extrato de Lewis (1989)

Nesse trabalho propõe-se a adimensionalização pela área LD , para o plano vertical e LB para o plano horizontal na superfície, pois se tratam das áreas projetadas dos fôlios submersos, como comumente se faz para asas.

A relação entre o primeiro e o segundo sistema é igual à meia razão de aspecto, como apresentado na Tabela 97.

Tabela 97 – Áreas de referência e relação entre os sistema

ÁREAS DE REFERÊNCIA	Plano Horizontal na superfície	Plano Vertical	Plano Horizontal Submerso
Sistema 1	LB	LT	LD
Sistema 2	L^2	L^2	L^2
Conversão do sistema 2 para 1	L/B	L/T	L/D

Devido à enorme confusão que causam essas diferentes adimensionalizações, exemplifica-se aqui no caso de Y_v' .

Tabela 98 – Adimensionalização para Y_v pela teoria de asas de pequena razão de aspecto.

ÁREA DE REFERÊNCIA (A_0)	Sistema 1 (LT)	Sistema 2 (L^2)
Y_v'	$-\frac{\pi}{2} \cdot \left(\frac{2T}{L} \right)$	$-\pi \cdot \left(\frac{T}{L} \right)^2$

6.9 CÁLCULO DAS DERIVADAS HIDRODINÂMICAS

As derivadas de maior interesse são as derivadas de velocidade, pois são elas que compõem o índice de estabilidade no plano horizontal e o índice de estabilidade em altas velocidades:

- (i) Y_v, Y_r, N_v, N_r , que compõem o índice de estabilidade no plano horizontal, ditas derivadas de velocidade;
- (ii) Z_w, Z_q, M_w, M_q , que compõem o índice de estabilidade no plano vertical em altas velocidades;

Mostram-se também, a título de ilustração, os métodos e formulações para os cálculos de massas adicionais que nada acrescentam de novo aos métodos de cálculo de derivadas de velocidade.

Além disso, apresentam-se séries de dados experimentais: as de Balau (1976), para lemes, e de Jorgensen (apud TRIANTAFYLLOU e HOVER, 2004). Essas séries apresentam coeficientes de sustentação e de momento que tanto podem ser aplicados ao plano vertical como horizontal. Didaticamente, as séries aparecem uma única vez com o intuito de avaliar os métodos em estudo.

6.10 CÁLCULO DAS DERIVADAS HIDRODINÂMICAS DE VELOCIDADE

Divide-se o tópico, primeiramente, no cálculo dessas derivadas no plano horizontal e, então, no plano vertical.

Algumas derivadas hidrodinâmicas são automaticamente eliminadas a partir de considerações de simetria e isotropia, e foi esse o artifício utilizado para obtenção do equacionamento no item 6.3.1.

Esgotadas as considerações de isotropia e simetria que permitiram o eliminar a maior parte dos coeficientes hidrodinâmicos lineares, como os posicionais, por exemplo, os valores dos demais coeficientes hidrodinâmicos não são de estimativa trivial.

Uma alternativa para o cálculo desses coeficientes é a utilização de modelos computacionais, como o método dos painéis ou a resolução das equações de Euler ou Navier-Stokes.

Opta-se, aqui, entretanto, por estimar esses coeficientes de forma analítico-empírica, pois o método computacional mais simples é sempre mais trabalhoso que o método analítico-empírico e, no atual estado da arte, requer validação posterior.

A utilização de modelos analítico-empíricos não está de forma alguma obsoleta. Ao contrário, é a mais utilizada em projeto e pode ser vista em recentes trabalhos, como o de Cabral Jr. e Morishita (1997) e de Ibarz, Lamas e Pena (2003). Além disso, é essa a abordagem recomendada por várias universidades nas etapas iniciais de projeto, quando ainda se tem uma geometria suscetível de modificações.

O emprego de modelos analítico empíricos para previsão das derivadas hidrodinâmicas está melhor desenvolvido para corpos na superfície que para corpos submersos. Apesar de o equacionamento do plano horizontal submerso ser idêntico ao do plano horizontal na superfície, tem-se que adequar o estudo dos coeficientes hidrodinâmicos ao caso submerso.

A diferença dos planos abaixo da superfície da água e do plano horizontal na superfície reside na hipótese de águas tranquilas que permite interpretar o navio como um corpo duplo, como em Gueler (1983) e em Lewis (1989) simplificando os cálculos. Nos corpos submersos, falta simetria com relação ao plano xy de forma que essa hipótese tem que ser cuidadosamente avaliada.

6.11 DISCUSSÃO SOBRE AS OS MÉTODOS ANALÍTICO EMPÍRICOS

Nesse item, discute-se o relacionamento das teorias que aqui se utilizam com o fim de obter as derivadas hidrodinâmicas: teoria de corpo esbelto; teoria potencial; teoria de asa de pequena razão de aspecto; teoria de faixas e método de conservação de energia.

A teoria potencial considera as velocidades no meio fluido como gradiente em cada ponto de um potencial de velocidades. Essa teoria, em sentido amplo, contém a teoria das faixas, a teoria de corpos esbeltos, a teoria de conservação de energia e a teoria de asas.

A teoria potencial (e, por extensão, a teoria de faixas) pode utilizar-se do método de conservação de energia para obtenção de alguns resultados e é isso que se faz aqui no capítulo teoria das faixas e conservação de energia.

A teoria das faixas é uma teoria mais antiga que a teoria de corpos esbeltos e que encontra a solução potencial do problema tridimensional com o uso do problema bidimensional (por faixas, *strips*, que são seções do navio), mas desconsidera a interação entre essas seções e, portanto, conduz a erros maiores, como explica Pesce (1988).

Ao se considerar a interação entre as seções obtém-se os resultados da teoria de corpos esbeltos propriamente dita. A forma de interação entre as seções é descrita através de um conjunto de funções (PESCE, 1988) que permitem compatibilizar o problema do potencial distante, onde o corpo se assemelha uma linha de fontes (dipolos) e do campo próximo, onde o corpo se assemelha a uma faixa (método de compatibilização assintótica, pois converge assintoticamente).

O método de compatibilização assintótica⁹ surgiu na engenharia aeronáutica no desenvolvimento da teoria de asas. As asas de pequena razão de aspecto são o limite em que a envergadura é muito pequena e a teoria bidimensional da asa é o limite em que a asa tem a envergadura infinita. A solução do problema está em se encontrar uma função que consiga satisfazer os limites e, então, ao intervalo entre esses limites.

Jones, elegantemente (apud ARANHA, 1990), chega à mesma formulação da teoria de asas de pequena razão de aspecto através de um desenvolvimento semelhante ao de Triantafyllou e Hover (2004) para corpos esbeltos.

⁹ expansão assintótica compatibilizada, na tradução quase literal de Pesce (1988)

6.12 CÁLCULO DAS DERIVADAS HIDRODINÂMICAS NO PLANO HORIZONTAL

A opção por modelos analítico-empíricos é feita a partir da aproximação do corpo por geometrias idealizadas. Assim, para o cálculo das derivadas hidrodinâmicas de interesse na manobra no plano horizontal, pode-se optar por:

- (i) Aproximar a geometria do casco pela de um corpo esbelto (todas as derivadas);
- (ii) Aproximar a geometria do casco pela de um elipsóide (massas adicionais e N_v);
- (iii) Aproximar a geometria do casco pela de uma asa de pequena razão de aspecto (para Y_v);
- (iv) Aplicar-se a teoria das faixas e conservação de energia cinética (massas adicionais e Y_r e N_v);e
- (v) Ajustes empíricos a valores teóricos, como em Clarke, Gedling e Hine (1982) (todas as derivadas);
- (vi) Séries de dados obtidos de experimentos.

6.12.1.1 CASCO COMO CORPO ESBELTO¹⁰

A teoria de corpos esbeltos¹⁰ apresenta-se como uma alternativa para o cálculo de todas as derivadas de velocidade e aceleração que influenciam no plano horizontal (e também vertical). Partindo de uma formulação geral que permite obter a força lateral (ou vertical), as derivadas surgem como os coeficientes dos termos multiplicadores da força lateral (ou vertical).

A alternativa representada pela aproximação da geometria do navio pela de um corpo esbelto é aqui apresentada e posteriormente comparada às demais alternativas.

O corpo esbelto é um corpo que tem duas dimensões pequenas em relação a uma terceira. Isso faz com que o escoamento fluido sofra pequenas variações ao longo de sua dimensão mais significativa. Matematicamente falando:

$$\frac{\partial}{\partial x} \ll \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \quad (251)$$

Dessa forma, tudo se passa, em cada seção, como se fosse bidimensional. A Figura 126 apresenta um corpo esbelto cuja força total teórica é igual a zero:

¹⁰ veja item 6.11

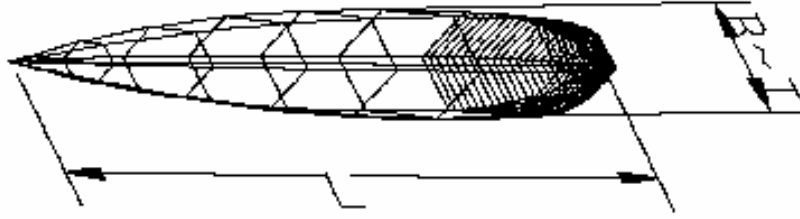


Figura 126- Corpo esbelto

A teoria de corpos esbeltos, da maneira simplificada como apresentada em Triantafyllou e Hover (2004), é rapidamente desenvolvida aqui, mas um tratamento mais detalhado pode ser encontrado em Newman (1977).

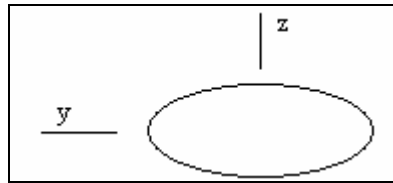


Figura 127 – Direção da massa adicional $a(x,t) = m_{yy}$

Seja $a(x,t)$ a massa adicional bidimensional de cada seção na posição x de um corpo num instante t , igual a $a(x,t) = m_{yy}$, como na Figura 127 . Ela será dada por:

$$a(x,t) = \int_S \phi \frac{\partial \phi}{\partial n} dS \quad (252)$$

Onde ϕ é o potencial de velocidades no plano yz , n é a normal e S fronteira da seção. Seja ∂Y a força elementar nessa fatia, pela segunda lei de Newton, a força é igual à variação da quantidade de movimento:

$$\partial Y = -\frac{d}{dt} [a(x,t) v_n(x,t)] dx \quad (253)$$

onde v_n é a componente de v perpendicular ao corpo. Lembrando que:

$$v_n = v + x r + U \alpha \quad (254)$$

onde α é o ângulo de ataque.

Substituindo a derivada por sua expressão de campo e a velocidade pelo valor acima, a força por seção x , passa a ser:

$$\frac{\partial Y}{\partial x} = -\left(\frac{\partial}{\partial t} - U \frac{\partial}{\partial x}\right) [a(x,t)(v(t) + x r(t) + U \alpha(t))] \quad (255)$$

A força total atuante no corpo esbelto, na direção Y , será:

$$Y = \int_{x_{cauda}}^{x_{bico}} \partial Y = -m_{22} \dot{v} - m_{26} \dot{r} - U a(x_{cauda})(v + x_{cauda} r + U \alpha(x_{cauda})) \quad (256)$$

Onde m_{22} e m_{26} são massas adicionais nas direções y e devidas a deslocamentos nessa direção e na direção y devida ao momento no eixo Z . São dadas por (corpo convenientemente mergulhado):

$$m_{26} = \int_{x_{cauda}}^{x_{bico}} x a(x) dx \quad (257)$$

$$m_{22} = \int_{x_{cauda}}^{x_{bico}} a(x) dx \quad (258)$$

Derivando-se com respeito à força lateral obtida, Y , com respeito às variáveis de interesse, v e r e suas derivadas, obtém-se todas as derivadas hidrodinâmicas necessárias ao plano horizontal.

6.12.1.2 CASCO COMO ELIPSÓIDE (N_v)

Consiste em aproximar o corpo submerso por um elipsóide equivalente, com três eixos diferentes, como em Ibarz, Lamas e Peña (2003).

A validade de tal aproximação refere-se tão somente ao cálculo das massas adicionais do submarino submerso e à derivada N_v .

Ibarz, Lamas e Peña (2003) aproximam um elipsóide de mesma massa do navio e com os semi-eixos a , b e c constituindo aproximadamente a envoltura desse corpo, assim¹¹:

$$m' = m / (\rho L^3 / 2) \quad (259)$$

$$a = L / 2 \quad (260)$$

$$b = D / 2 \quad (261)$$

$$c = B / 2 \quad (262)$$

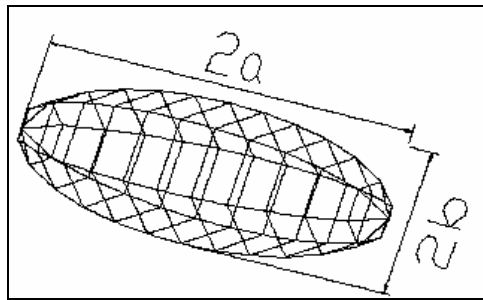


Figura 128 - Elipsóide de revolução

A consideração do navio como elipsóide conduz aos seguintes resultados:

$$Y_v = Y_r = 0 \quad (263)$$

¹¹ as expressões para a , b e c são a interpretação desse autor para o exposto em Ibarz, Lamas e Peña (2003).

$$N_r = 0 \quad (264)$$

Note-se que, apesar de derivada de observações experimentais, concorda plenamente com a teoria de corpos esbeltos.

Para N_v , a aproximação por um elipsóide equivalente considera apenas a parcela referente ao momento de Munk desprezando o efeito de separação, o que apresenta um erro de aproximadamente 30%. Todas as massas adicionais para o corpo submerso podem ser obtidas das massas do elipsóide com os eixos calculados a partir dos dados do navio.

6.12.1.3 CASCO COMO ASA DE PEQUENA RAZÃO DE ASPECTO (Y_v)

Na superfície, a técnica mais usada para o cálculo de Y_v é a aproximação da geometria do casco pela geometria de uma asa com pequena razão de aspecto.

Embora, para o plano horizontal submerso, mais comumente, se use a teoria de corpos esbeltos de Newman (1977), como apresentado em Bohlmann (1989), existem referências, como Gueler (1983), que adotam a aproximação dos submersíveis por asas de pequena razão de aspecto, também quando submersos, em virtude de hipóteses de axissimetria.

Nesse trabalho, considerações adequadas permitem superar a falta de simetria, como apresentado no item 6.12.1.3.2.

6.12.1.3.1 CÁLCULO DE Y_v PARA A SUPERFÍCIE

A manobra se passa em águas calmas, então, o plano horizontal representado pela superfície da água, funciona como um plano de simetria para a embarcação que se transforma em um corpo duplo, com as obras vivas refletidas para cima, como se pode observar na Figura 129.

A utilização da teoria de asas de pequena razão de aspecto para o cálculo de Y_v , faz com que o navio seja entendido como uma asa, com L -comprimento fazendo o papel da corda, $2 \cdot T$, duas vezes o calado, o da envergadura e B – boca- o da espessura:

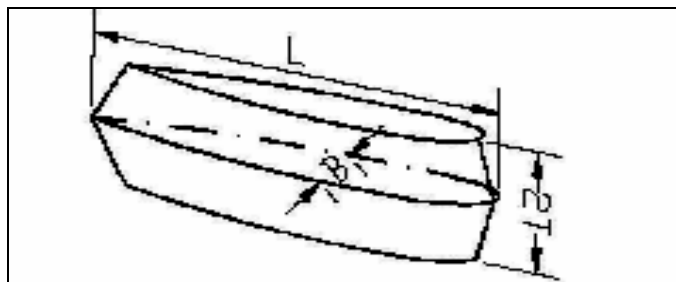


Figura 129 – Navio como asa de pequena razão de aspecto no plano horizontal

Considerando um f3lio como o da figura a seguir, que se desloca com velocidade total V, com rela33o aos eixos absolutos:

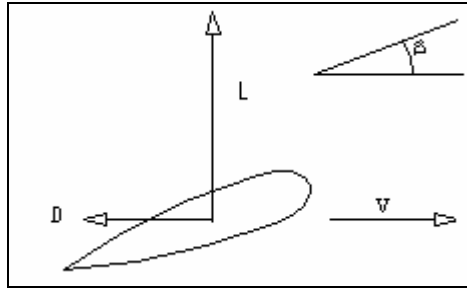


Figura 130- Escoamento incidente em um f3lio com velocidade V

O escoamento incidente com um 3ngulo de ataque $\hat{A}$, produz as for3as L (sustenta33o ou *lift*) no sentido perpendicular ao fluxo e D, no sentido do fluxo. O f3lio acima pode ser entendido como navios ou submarinos no plano horizontal, ou submarinos no plano vertical.

A for3a resultante no eixo perpendicular ao eixo da embarca33o 3 a composi33o de L e D, como pode ser visualizada na figura a seguir:

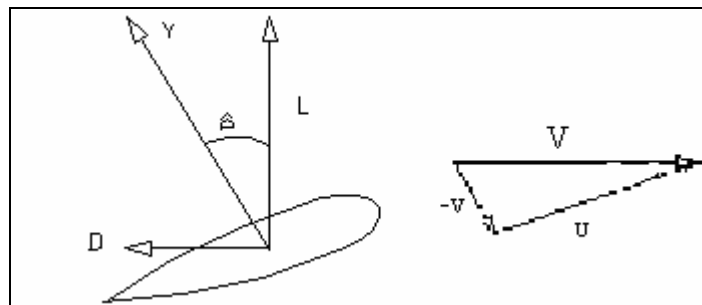


Figura 131 – Escoamento incidente em um f3lio ($\hat{A}$ 3 o 3ngulo de ataque)

Essa for3a seria dada por:

$$Y(\hat{A}) = L \cos(\hat{A}) + D \sin(\hat{A}) \quad (265)$$

Derivando em rela33o a $\hat{A}$:

$$Y_{\hat{A}} = L_{\hat{A}} \cos(\hat{A}) + D_{\hat{A}} \sin(\hat{A}) - L \sin(\hat{A}) + D \cos(\hat{A}) \quad (266)$$

Onde U 3 uma constante (movimento de refer3ncia). Fazendo $\hat{A}=0$ tem-se:

$$Y_{\hat{A}} = L_{\hat{A}} + D \quad (267)$$

Da Figura 131, tem-se que $\tan(\hat{A}) = -v/U$, e portanto, $\hat{A} = \arctan(-v/U)$, que derivando fica:

$$\frac{\partial \hat{A}}{\partial v} = \frac{1}{1 + \left(-\frac{v}{U}\right)^2} \left(-\frac{1}{U}\right) \sim -\frac{1}{U} \quad (268)$$

A express3o acima 3 tanto mais verdadeira quanto mais pr3xima de zero estiver $\hat{A}$.

Se aplicada, para Y_v , a regra da cadeia, tem-se:

$$Y_v = \frac{\partial Y}{\partial \hat{A}} \frac{\partial \hat{A}}{\partial v} = -Y_{\hat{A}} / U \quad (269)$$

Como a superfície do navio é entendida como um fólio, valem as relações desenvolvidas para o coeficiente de *lift* C_L e arrasto, C_D , logo:

$$Y_v = -\frac{\frac{1}{2} \rho U^2 (LT) \left(\frac{\partial C_L}{\partial \hat{A}} + (Cd)_h \right)}{U} = -\frac{1}{2} \rho U (LT) \left(\frac{\partial C_L}{\partial \hat{A}} + (Cd)_h \right) \quad (270)$$

Onde LT é a área lateral do navio. Adimensionalizando-se pelo produto $\frac{1}{2} \rho L T U$ Finalmente tem-se;

$$Y_v' = -\frac{Y_v}{\frac{1}{2} \rho U (LT)} = -\left(\frac{\partial C_L}{\partial \hat{A}} + (Cd)_h \right) \quad (271)$$

onde o subíndice h indica que o coeficiente se refere ao casco nu (*hull* em inglês).

Outras fontes, que chegam ao mesmo resultado para Y_v' , são interessantes como alternativas a essa dedução e podem ser encontradas em Jones, et al. (2002) e no PNA (LEWIS, 1989).

Jones (1946) deduziu a sustentação de uma asa de razão de aspecto zero, $AR = \text{envergadura}/\text{corda} \sim 0$, com ponta (como a proa dos navios), obtendo excelentes resultados experimentais.

Na verdade, pode-se dizer que Jones (1946) tenha deduzido uma força de sustentação numa asa de razão de aspecto tendendo a zero, ou seja,

$$AR = \lim_{\text{corda} \rightarrow \infty} \frac{\text{envergadura}}{\text{corda}} \quad (272)$$

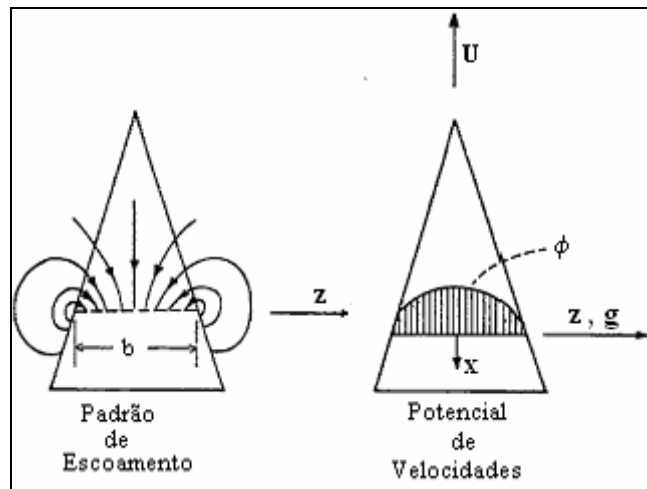


Figura 132 – Asa de razão de aspecto zero (adaptada de Jones (1946))

Deduz-se aqui sucintamente a formulação que dá a declividade da curva do coeficiente de sustentação

Seja U a velocidade de avanço da asa, como na Figura 132. Assim $U \sin(\hat{A})$ passa a ser a velocidade vertical, que linearizada dá $U\hat{A}$. Supondo agora, assim como em Jones (1946), que a distribuição de potencial de velocidade ϕ é elíptica nessa seção, como apresentado na Figura 133, essa distribuição se dá por:

$$\phi = \pm U\hat{A} \sqrt{\left(\frac{s}{2}\right)^2 - z^2} \quad (273)$$

onde s é a envergadura seccional.

Chamando de p a pressão na fatia, f uma função qualquer, e aplicando-se a Integral de Euler a um mesmo ponto, a diferença entre as pressões direita e esquerda são dadas por:

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}(U\hat{A})^2 + gz + f(t) \right)_{\text{esquerda}} = \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}(U\hat{A})^2 + gz + f(t) \right)_{\text{direita}} \quad (274)$$

lembrando que a cota z é constante em ambos os bordos do ponto, a velocidade é igual em ambas as faces no mesmo instante, pois não há circulação, tem-se que:

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_{\text{esquerda}} = - \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_{\text{direita}} \quad (275)$$

$$(f(t))_{\text{superior}} = (f(t))_{\text{inferior}} \quad (276)$$

pois $f(t)$ é uma função de ponto, fica-se com

$$p_{\text{superior}} - p_{\text{inferior}} = \Delta p = 2\rho \frac{\partial \phi}{\partial t} = 2\rho \frac{\partial x}{\partial t} \frac{\partial \phi}{\partial x} = 2\rho U \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (277)$$

e reduzindo os termos, tem-se:

$$\Delta p = 2\rho U \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (278)$$

A pressão Δp integrada no sentido da corda deve igualar a força de sustentação, Y , de toda a asa por fatia no sentido da envergadura, dessa forma:

$$\frac{\partial Y}{\partial z} = \int \Delta p dx \quad (279)$$

Dessa forma, integrando-se em x tem-se:

$$\frac{\partial Y}{\partial z} = 2\rho U \phi \quad (280)$$

e, portanto,

$$\frac{\partial Y}{\partial z} = 2\rho U^2 \hat{A} \sqrt{\left(\frac{s}{2}\right)^2 - z^2} \quad (281)$$

integrando-se agora no sentido da envergadura, tem-se:

$$Y = \frac{\pi}{4} \rho U^2 s_{\max}^2 \hat{A} \quad (282)$$

onde $s_{\max}$ é a maior envergadura, e a integral de ϕ é a área de uma elipse com semi-eixos $U\hat{A}$ e $s_{\max}$. Adimensionalizando-se agora pela área $Ls_{\max}$ e pelo produto $\frac{1}{2}\rho U^2$, tem-se

$$C_L = \frac{Y}{\frac{1}{2}\rho U^2 L s_{\max}} = \frac{\frac{\pi}{4}\rho U^2 s_{\max}^2 \hat{A}}{\frac{1}{2}\rho U^2 L s_{\max}} = \frac{\pi}{2} \frac{s}{L} \hat{A} = \left(\frac{\pi}{2} AR\right) \hat{A} \quad (283)$$

E assim se encontra o conhecido coeficiente de Jones (1946), onde AR , é a razão de aspecto:

$$\frac{\partial C_L}{\partial \hat{A}} = \frac{\pi}{2} AR \quad (284)$$

No caso do navio na superfície, AR vale, $2T/L$, pois se comporta como um corpo duplo. Essa hipótese permite calcular Y_v' (LEWIS, 1989):

$$(Y'_v)_h = \frac{-\pi T}{L} + (C_d)_h \quad (285)$$

onde (o índice h , do inglês *hull*, refere-se a casco em oposição às superfícies de controle f , do inglês, *fin*)

$$(C_d)_h = \frac{D_h}{\frac{1}{2}\rho A_T U^2} \quad (286)$$

O termo $(C_d)_h$ é um coeficiente de arrasto acrescentado de forma a incorporar o efeito da viscosidade e recomenda-se que seja retirado da curva de resistência ao avanço D_h (LEWIS, 1989).

Nesse trabalho, recomenda-se que, para baixas velocidades, ou seja, até o número de Froude de 0.15, seja tomada a formulação da ITTC (1957):

$$(C_d)_h = \frac{0.075}{(\log(\text{Re}) - 2)^2} \quad (287)$$

$$\text{Re} = UL / \nu \quad (288)$$

onde Re é o número de Reynolds, U é a velocidade de referência e ν é a viscosidade cinemática.

A recomendação de se usar o valor fornecido pela ITTC (1957) se dá em virtude de que o erro em $(C_d)_h$, em baixas velocidades, está em torno de 10% quando

comparado com os valores da curva de resistência. $(C_d)_h$, por outro lado, é a menor parcela que compõe o coeficiente Y_v (e com a rotação de 90° , Z_w) não constituindo parcela superior a 10% do total. O erro em Y_v em utilizar-se $(C_d)_h$ a partir da formulação da ITTC (1957), portanto, não ultrapassa 2%.

Outro aspecto importante a ser discutido é que a formulação de Jones (1946) considera uma asa de razão de aspecto zero sem espessura. Para corrigir isso, Bohlmann (1989) recomenda que seja introduzida uma expressão em Z_w que corrija o efeito de falta de espessura, nessa derivada.

Analogamente, nesse trabalho, pensa-se ser necessário incluir também o efeito da espessura em Y_v , pois se considera que essa derivada padece dos mesmos efeitos que Z_w . O efeito de espessura será melhor avaliado posteriormente, onde se conclui que, pelo menos dentro das hipóteses desse trabalho, não necessita de inclusão.

6.12.1.3.2 Y_v NO PLANO HORIZONTAL SUBMERSO

Como se verá as formulações do plano horizontal na superfície serão também empregadas na condição submersa em razão do desenvolvimento que se segue.

Na superfície, como a manobra se passa em águas calmas, o plano horizontal, na altura do calado, funciona como um plano de simetria para a embarcação que é considerada como um corpo duplo, como se pode observar na Figura 129.

Esse plano de simetria viabiliza uma aplicação rápida da teoria de asa de pequena razão de aspecto.

De fato, excetuados os torpedos, a simetria com relação a um plano horizontal não existe na quase totalidade dos veículos submersos, e em especial, não existe na versão em estudo V2A.

A falta de simetria abre o questionamento sobre a validade da aplicação dessa teoria.

Sem a simetria, as asas que mais se aproximam dos veículos submersos são asas assimétricas, como na idealização de um submarino encontrada em Saunders (1965).

As asas assimétricas ocorrem na prática, como as asas dos lemes de aviões, mas têm um comportamento de difícil previsão teórica e poucos resultados experimentais divulgados na literatura. Costuma-se resolver o problema com o uso de CFD ou de dados de túneis de vento.

A utilização de CFD que incorpore a espessura da asa e efeitos viscosos, ou realização de ensaios para asas, é descartada nesse trabalho, porque não faz sentido ensaiar uma asa idealizada, computacional ou fisicamente, pois o esforço é quase o mesmo que se ensaiar o próprio veículo.

Uma solução alternativa e simplista é considerar a asa assimétrica como a soma de duas asas simétricas, e verificar essa hipótese.

Parece ser intuitiva a visão do submarino submerso como duas asas: uma inferior, com a corda igual ao comprimento e a envergadura igual ao calado; e outra superior, com a corda igual ao pontal menos o calado.

Como consequência dessa intuição, espera-se que o coeficiente de sustentação total do navio seja a soma de dois coeficientes: um relativo à asa superior e outro à asa inferior.

Entretanto, não é isso que se verifica ao computar-se o efeito dos coeficientes de sustentação dessas asas assimétricas. Numericamente, mostra-se que uma asa assimétrica no sentido da envergadura não é a soma de duas asas simétricas.

A verificação da hipótese quanto à composição do coeficiente de sustentação total da asa, se faz com o uso do método da malha de vórtices, explicado no 6.16, através do programa desenvolvido por Sovieiro e Wanderley (1991), e, presentemente, modificado para abranger o cálculo de asas assimétricas.

O método da malha de vórtices (*vortex lattice method*, VLM) divide a asa em vários vórtices de ferradura, ou seja, “asinhas”, o que permite calcular a contribuição de cada uma de suas partes, inferior e superior e o coeficiente de todos os elementos no total. Note-se que apesar de validado para o caso de asas de grande razão de aspecto, os valores apresentados são apenas qualitativos, no caso de asas de pequena razão de aspecto. A Figura 134 representa as asas testadas (todas com espessuras igual a zero, e meia envergadura inferior igual a 0.06).

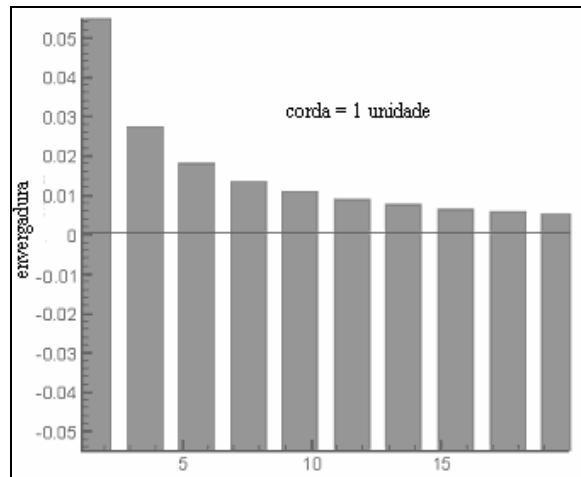


Figura 134 –Asas testadas a partir do VLM

A Figura 135 apresenta a contribuição para o coeficiente de sustentação total em função das razões de suas envergaduras. Se as asas colaborassem na proporção de suas envergaduras ter-se-ia a reta contínua, mas o fato é que o cálculo via malha de vórtices mostra que a contribuição é não-linear:

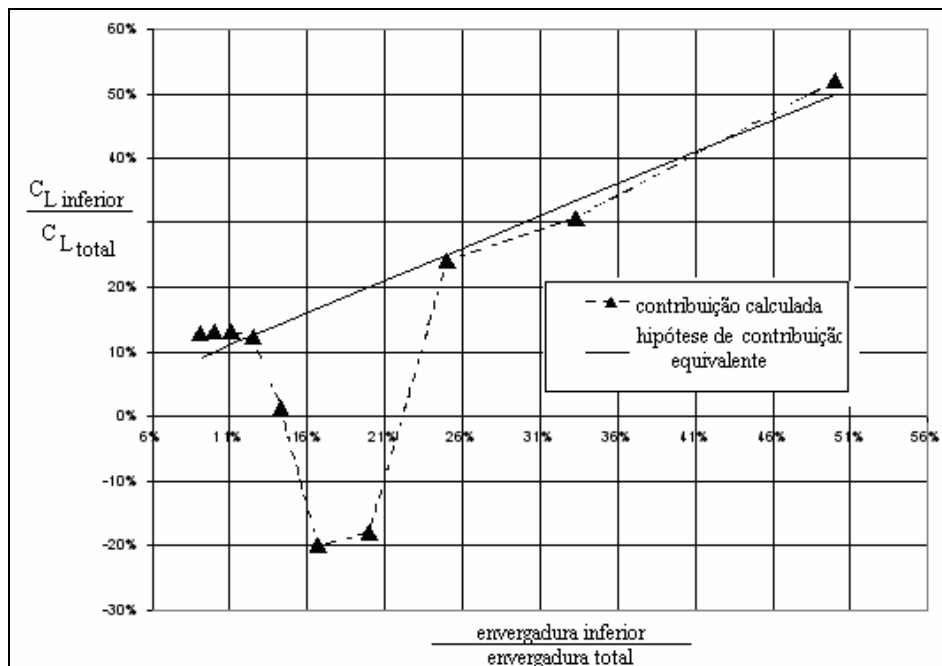


Figura 135 –Contribuição do C_L da asa inferior para o C_L total plotado contra a razão entre as envergaduras.

No gráfico da Figura 135 a corda é unitária e a envergadura inferior vale 0.06. Os valores do coeficiente de momento foram subtraídos da investigação, porque são iguais aos valores de sustentação multiplicados pela distância ao centro de pressão, donde não representam dados adicionais, uma vez que o centro de pressão é dado de entrada, constante para toda a asa.

Novamente, com o uso do método da malha de vórtices, monta-se a tabela a seguir, em que se apresenta, em porcentagem, o erro que se comete quando se tenta calcular a sustentação de uma asa assimétrica vertical de pequena razão de aspecto considerando-a formada de duas outras asas simétricas, uma inferior e outra superior. Na coluna média, apresenta-se o coeficiente de sustentação calculado pela média aritmética simples dos coeficientes das duas asas. Na coluna ponderada o coeficiente é calculado pela razão entre as envergaduras e a envergadura total. A coluna AR, significa a razão de aspecto total. A coluna %E, significa a porcentagem da envergadura da asa superior na envergadura total.

Tabela 99 – Razão de aspecto (AR), fração da corda superior em relação à inferior (%s), desvio com relação à média (média), desvio com relação a média ponderada (média ponderada)

AR	%s	média	ponderada
0.1200	1.0000	0%	0%
0.0900	0.5000	-65%	-64%
0.0800	0.3333	1%	11%
0.0750	0.2500	527%	613%
0.0720	0.2000	614%	733%
0.0700	0.1667	194%	249%
0.0686	0.1429	128%	175%
0.0675	0.1250	129%	179%
0.0667	0.1111	127%	179%
0.0660	0.1000	127%	181%

Finalmente, pode-se escrever que:

$$C_{Ltotal} \neq (C_{Linferior} + C_{Lsuperior})/2 \quad (289)$$

E também que

$$C_{Ltotal} \neq (s_{superior}C_{Linferior} + s_{inferior}C_{Lsuperior})/(s_{superior}+s_{inferior}) \quad (290)$$

onde os índices superior e inferior referem-se as asas simétricas superior e inferior. O símbolo C_L é o coeficiente de *lift*, e o símbolo s é a envergadura.

Dessa forma parece conveniente a consideração do navio como uma única asa, de razão de aspecto igual ao pontal sobre o comprimento.

A mesma discussão é válida para a falta de simetria no plano vertical.

6.12.1.3.3 ANALOGIA COM UMA ASA E DEMAIS DERIVADAS DE VELOCIDADE

Norrbin (1971) apresenta as demais derivadas de velocidade, ainda fazendo analogia com uma asa:

$$(Y'_v)_h = -\frac{\pi}{2} AR = -\pi \frac{T}{L} \quad (291)$$

$$(Y'_r)_h = \frac{\pi}{4} AR = \frac{\pi T}{2L} \quad (292)$$

$$(N'_v)_h = -\frac{\pi}{4} AR = -\frac{\pi}{2} \frac{T}{L} \quad (293)$$

$$(N'_r)_h = -\frac{\pi}{8} AR = -\frac{\pi}{4} \frac{T}{L} \quad (294)$$

onde $AR=2T/L$, para o plano horizontal na superfície.

No plano horizontal submerso, tem-se:

$$(Y'_v)_h = -\frac{\pi}{2} AR = -\pi \frac{D}{2L} \quad (295)$$

$$(Y'_r)_h = \frac{\pi}{4} AR = \frac{\pi D}{4L} \quad (296)$$

$$(N'_v)_h = -\frac{\pi}{4} AR = -\frac{\pi}{4} \frac{D}{L} \quad (297)$$

$$(N'_r)_h = -\frac{\pi}{8} AR = -\frac{\pi}{8} \frac{D}{L} \quad (298)$$

onde $AR=D/L$, para o plano horizontal na superfície.

6.12.1.4 TEORIA DAS FAIXAS E CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

Como nota introdutória, gostar-se-ia de esclarecer que a teoria de faixas também considera o navio como um corpo esbelto, sem considerar a interação entre as seções bidimensionais, caso contrário, os efeitos tridimensionais não permitiriam um tratamento do problema como aqui exposto.

Esse tópico toca basicamente no desenvolvimento das derivadas Y_r , N_r e N_v .

A derivada hidrodinâmica Y_r é decorrente da força centrífuga que surge com a mudança de proa constante no tempo da embarcação (LEWIS,1989). Essa componente hidrodinâmica tem uma parcela devida ao escoamento potencial e outra decorrente do efeito de separação.

Chamando de Q a quantidade de movimento para um corpo imerso num fluido (com unitários i e j presos ao corpo, nas direções x e y) tem-se:

$$Q = m_{11}ui + m_{22}vj \quad (299)$$

A segunda lei de Newton relaciona a força à quantidade de movimento:

$$\frac{dQ}{dt} = m_{11}u \frac{d}{dt}i + m_{22}v \frac{d}{dt}j + m_{11}\dot{u}i + m_{22}\dot{v}j \quad (300)$$

E a força lateral passa a ser:

$$Y = -\frac{dQ}{dt} \cdot j \quad (301)$$

No caso em que o corpo realiza um giro com velocidade constante r , tem-se: $u = U$; $v=0$, $du/dt=0$, $dv/dt=0$; $di/dt=rj$; $dj/dt=-ri$

$$Y = -m_{11}Ur \quad (302)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial r} = Y_r = -m_{11}U \quad (303)$$

A derivada N_v surge quando o caso em que o corpo realiza translação retilínea com velocidade constante, com um ângulo de ataque. Nesse caso, essa derivada se compõe de duas parcelas: uma potencial, momento de Munk, e outra viscosa, representada pelo deslocamento do ponto de aplicação da força Y em função da separação.

A expressão do momento de Munk surge da conservação do momento angular, (com um sistema de eixos, agora inercial): $u = U\sin(\alpha)$; $v = U\cos(\alpha)$, $du/dt=0$, $dv/dt=0$; $di/dt=0$; $dj/dt=0$ e chamando de R_G o raio do centro de gravidade. (ARANHA, 1991)

$$M_{Munk} = \frac{d}{dt}(R_G \wedge Q) = R_G \wedge \frac{dQ}{dt} + \frac{dR_G}{dt} \wedge Q \quad (304)$$

$$\frac{d}{dt}Q = 0 \quad (305)$$

$$M_{Munk} = \frac{dR_G}{dt} \wedge Q = U \wedge Q = (m_{22} - m_{11})U^2 \sin(\alpha)\cos(\alpha) \quad (306)$$

Lembrando que $\alpha=v/U$, e $\alpha \ll$.

$$N_v = -(m_{22} - m_{11})U \quad (307)$$

Jacobs (1964) (apud LEWIS, 1989) desenvolve uma expressão para N_v que incorpora também o efeito da separação:

$$N_v' = -(m_{22}' - m_{11}') + \frac{x_p}{L} Y_v' \quad (308)$$

$$m'_{11} = k_1 m' \quad (309)$$

onde k_1 está definido no item 6.16.

$$m_{22} = \left(\frac{1}{2} \rho \frac{L}{T} \right) \pi k_2 \int C_s T(x)^2 dx \quad (310)$$

onde C_s é o coeficiente de massa adicional seccional, $T(x)$, o calado local, e k_2 está definido no item 6.16.

Definindo x_p como o centro de área lateral, a partir do centro de gravidade, como explicado em Gueler (1983):

$$\bar{x} = \frac{\int T(x) x dx}{\int T(x) dx} \quad (311)$$

$$x_p = \bar{x} - X_{CG} \quad (312)$$

onde X_{CG} é a coordenada do centro de gravidade.

A primeira parcela de N_v é o próprio momento de Munk adimensionalizado. A segunda parcela é viscosa, corresponde ao momento de separação de Triantafyllou e Hover (2004) e resulta da sustentação na asa idealizada multiplicada pelo braço entre seu ponto de aplicação no fluido real e a seção mestra.

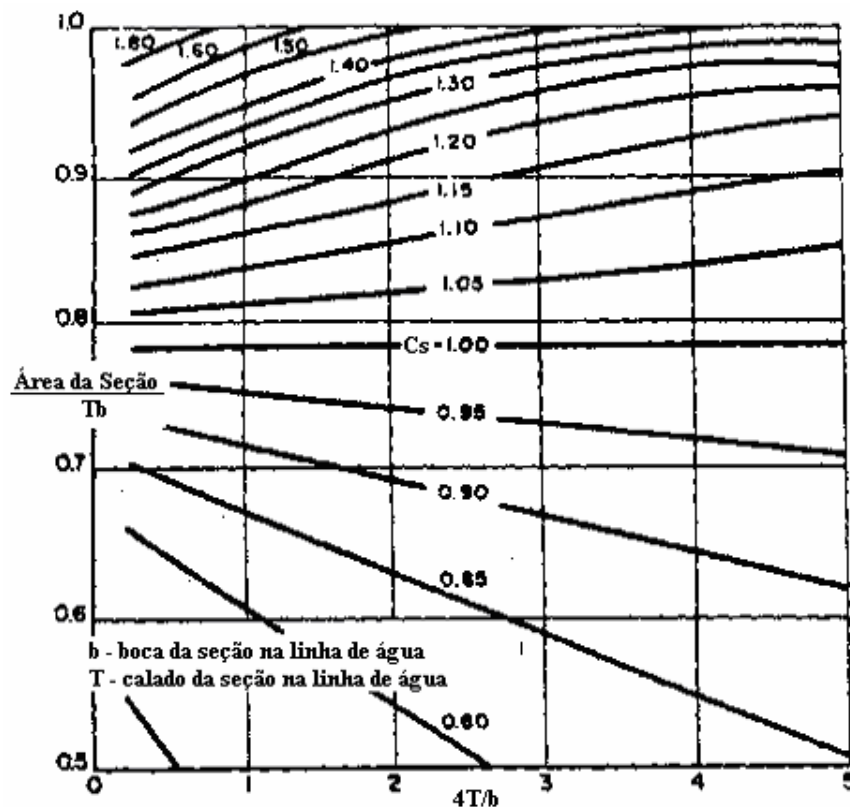


Figura 136 – Coeficientes de Massa adicional Seccional C_s de Prohaska (1947), através de adaptação de Lewis (1989)

Lembrando que a força de sustentação atua na asa-navio no centro de pressão de separação aparece a força lateral proporcional ao *lift*. Assim tem-se a equação para Y_r .

$$Y_r = -m_{11}U + x_p Y_v \quad (313)$$

Embora considerações potenciais indiquem que N_r deva ser zero, Jacobs (1964 apud Lewis, 1989) expressa N_r como função da derivada de sustentação e do ponto de aplicação do momento de separação.

$$N'_r = -k' m' \frac{x_1}{L} + \left(\frac{c_p}{2} \right)^2 Y'_v \quad (314)$$

onde c_p é o coeficiente prismático, k' é o coeficiente de massa adicional de rotação de um elipsóide, L é o comprimento do navio e x_1 é

$$x_1 = \frac{\int C_s T^2(x) x dx}{\int C_s T^2(x) dx} \quad (315)$$

onde C_s é o coeficiente de massa adicional por seção e $T(x)$ é o calado por seção, e x é medido a partir da seção média, positivo para proa e negativo para popa.

Como se vê, N_r expressa o balanço físico entre proa e popa, sendo um valor pequeno, pois tem uma parcela proporcional ao coeficiente prismático ao quadrado e outra parcela de 10 a 100 vezes menor que a massa do navio.

6.12.1.5 AJUSTES EMPÍRICOS A VALORES TEÓRICOS

Clarke, Gedling e Hine (1982) fazem ajustes obtidos por regressões sobre bancos de dados de navios aos valores provenientes da teoria de corpos esbeltos. Nessas fórmulas, T é o calado, L o comprimento B a boca e C_B o coeficiente de bloco.

Dessa forma, esses autores obtiveram:

$$(Y'_v)_h = -\frac{\pi T}{L} \left[1 + 0.4 C_B \frac{B}{T} \right] \quad (316)$$

$$(Y'_r)_h = -\frac{\pi T}{L} \left[-\frac{1}{2} - 0.08 \frac{B}{T} + 2.2 \frac{B}{L} \right] \quad (317)$$

$$(N'_v)_h = -\frac{\pi T}{L} \left[\frac{1}{2} + 2.4 \frac{T}{L} \right] \quad (318)$$

$$(N'_r)_h = -\frac{\pi T}{L} \left[\frac{1}{4} + 0.039 \frac{B}{T} - 0.56 \frac{B}{L} \right] \quad (319)$$

De forma semelhante, Inoue (1981) realizou ajustes com base na teoria de superfícies de sustentação, obtendo:

$$(Y'_v)_h = -\frac{\pi T}{L} + 1.4 C_B \frac{B}{L} \quad (320)$$

$$(Y'_r)_h = -\frac{\pi T}{2L} \quad (321)$$

$$(N'_v)_h = -\frac{2T}{L} \quad (322)$$

$$(N'_r)_h = \left(\frac{2T}{L} \right)^2 - 0.54 \frac{2T}{L} \quad (323)$$

6.13 DERIVADAS HIDRODINÂMICAS DO PLANO VERTICAL

O cálculo de derivadas hidrodinâmicas do plano vertical realizado nesse trabalho também envereda por modelos analítico-empíricos.

A novidade se encontra em empregar uma rotação de 90° em torno do eixo x de forma a se utilizar das conhecidas formulações para o plano horizontal.

As deduções são análogas às já realizadas no plano horizontal e são poupadas, mas é necessária a discussão acerca das hipóteses, principalmente no que se refere à rotação de 90° .

Dos métodos já expostos no item 6.11, alguns não são usados no plano vertical. Dessa forma são novamente apresentados com a respectiva utilização anterior:

- (i) Aproximar a geometria do casco pela de um corpo esbelto (todas as derivadas). Recomendado por Bohlmann (1989);
- (ii) Aproximar a geometria do casco pela de um elipsóide (massas adicionais e M_w). Utilizado por Ibarz, Lamas e Peña (2003);

Além dessas, com o artifício de rodar de 90° em torno do eixo x, pode-se utilizar das conhecidas formulações para o plano horizontal.

- (iii) Aproximar a geometria do casco pela de uma asa de pequena razão de aspecto (para Z_w);
- (iv) Aplicar-se a teoria das faixas e conservação de energia cinética (massas adicionais e Z_q e M_w);
- (v) Ajustes empíricos a valores teóricos, como em Clarke, Gedling e Hine (1982) (todas as derivadas);
- (vi) Séries de dados obtidos de experimentos.

Tem-se notícia da utilização de (iii) e (iv), por Gueler (1983), no plano vertical, indiretamente, em razão de hipótese de axissimetria, o que fez: $Z_w=Y_v$, $Z_q=Y_r$ e $M_q=N_v$.

Pode-se afirmar, então, que esses métodos apesar de amplamente usados no plano horizontal na superfície não têm encontrado aplicação no plano horizontal submerso, e nem tampouco no plano vertical.

A não aplicação de métodos razoáveis como a aproximação por uma asa de pequena razão de aspecto e teoria de faixas é resultado da falta de simetria que tem impellido os projetistas e pesquisadores no sentido de abandonar essas teorias e partir para teorias que diretamente resolvem o problema de cálculo das derivadas

hidrodinâmicas como os métodos (i) e (ii), ou seja, a aproximação do casco por um corpo esbelto ou um elipsóide.

Nesse trabalho, propõe-se uma forma de aplicar os métodos (iii) (iv) e (v) no plano vertical, a partir de um artifício, que seria um giro de 90° das formas da embarcação em torno de seu eixo longitudinal, x.

Discute-se, ainda, a proposta de consideração do efeito de espessura do submarino da mesma forma que Bohlmann (1989) modificando as derivadas Z_w ou Y_v . Enquanto Bohlmann (1989) propõe uma função a partir do trabalho de Hoerner (1975), esse trabalho estuda também o efeito de espessura de Balau (1976), conforme será mais tarde discutido.

As séries de dados empíricos aqui apresentadas são as de Balau (1976), para lemes, e de Jorgensen (apud TRIANTAFYLLOU e HOVER, 2004). Essas séries apresentam coeficientes de sustentação e de momento que tanto podem ser aplicados ao plano vertical como horizontal. Didaticamente aparecem uma única vez para servirem à comparação com os dados experimentais existentes na literatura.

6.13.1.1 CASCO COMO CORPO ESBELTO

Sejam $a(x,t)$ definidas como as massas adimensionais seccionais na direção z, assim $a(x,t)=m_{zz}$. Seja ∂Z a força elementar em uma fatia do corpo, pela segunda lei de Newton, a força é igual a variação da quantidade de movimento do fluido:

$$\partial Z = -\frac{d}{dt}[a(x,t)w_n(x,t)]dx \quad (324)$$

Onde w_n é a componente de w perpendicular ao corpo. Lembrando que:

$$w_n = w - xq - U\alpha \quad (325)$$

Substituindo a derivada por sua expressão de campo e a velocidade pelo valor acima a força por seção x, passa a ser:

$$\frac{\partial Z}{\partial x} = -\left(\frac{\partial}{\partial t} - U \frac{\partial}{\partial x}\right)[a(x,t)(w(t) - xq(t) - U\alpha(t))] \quad (326)$$

A força total atuante no corpo esbelto, na direção Z, será;

$$Z = \int_{x_{cauda}}^{x_{bico}} \partial Z = -m_{33}\dot{w} - m_{35}\dot{q} - Ua(x_{cauda})(w - x_{cauda}q - U\alpha(x_{cauda})) \quad (327)$$

Onde m_{33} e m_{35} são massas adicionais nas direções Z devidas a deslocamentos nessa direção e na direção Z devida ao momento no eixo Y. São dadas por

$$M_{\dot{w}} = m_{35} = \int_{x_{cauda}}^{x_{bico}} x a(x) dx \quad (328)$$

$$Z_{\dot{w}} = m_{33} = \int_{x_{cauda}}^{x_{bico}} a(x) dx \quad (329)$$

E derivando Z com relação a w, obtém-se Z_w' :

$$Z_w' = \frac{1}{\frac{1}{2} \rho L B U} \int_{x_{B \max}}^{x_{FP}} \frac{\partial m_{33}}{\partial x} dx = \frac{1}{\frac{1}{2} \rho L B U} a_{33}(x_{B \max}) \quad (330)$$

$$Z_w' = -\frac{\pi B}{2L} \quad (331)$$

onde $x_{B \max}$ é a boca máxima, e a_{33} é massa dessa seção.

6.13.1.2 TEORIA DAS FAIXAS E CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

O trabalho de Bohlmann (1989) de estimativas teóricas para derivadas hidrodinâmicas e sua comparação com resultados de tanques de provas para submarinos erros menores de 20% em 26 das 39 derivadas avaliadas e menor de 10% em 20 delas, sem precisar quais sejam.

Parece interessante, então, um estudo mais profundo desse trabalho que congrega a teoria de corpos esbeltos, considerações potenciais e considerações viscosas (*cross flow*).

Além da já apresentada Z_w , Bohlmann (1989) oferece para as derivadas de interesse no plano vertical:

$$Z_q' = -X_{\dot{u}}' = -k_1 m' \quad (332)$$

$$M_w' = -X_{\dot{u}} - Z_{\dot{w}} \quad (333)$$

$$M_q' = -Z_{\dot{q}} = -M_{\dot{w}} \quad (334)$$

A formulação de Z_q apresentada é análoga à derivação de Y_r , agora com giro no plano vertical e não no plano horizontal, e por isso aparece o termo de massa adicional em x. Comparando-se ambos os resultados, percebe-se que falta uma parcela em Z_q devida ao momento de separação.

M_w , obtido por Bohlmann (1989), apresenta-se como a parcela de Munk, somente, pois termo de separação que aparece em Y_v não se encontra presente.

M_q correlata a N_r apresenta-se em Bohlmann (1989) associada à massa adicional vertical surgida em um giro, ou seja, m_{35} . Ao contrário, N_r , como calculada

por Jacobs (1964 apud Lewis, 1989), apresenta uma parcela devida à separação e com isso aparenta ser mais precisa, qualitativamente.

As equações de Bohlmann (1989) parecem incrivelmente simples. Devem aplicar-se a cascos de submarinos modernos, que são também figuras geométricas quase axisimétricas.

Não parece razoável que as derivadas do plano vertical tenham forma tão distinta das do plano horizontal.

6.13.1.3 CASCO COMO ELIPSÓIDE

A comparação do casco a um elipsóide como no plano horizontal permitiu a obtenção das derivadas no plano vertical, pois se trata do mesmo elipsóide.

Assim são obtidas as derivadas:

$$Z_w = Z_q = 0 \quad (335)$$

$$M_q = 0 \quad (336)$$

$$M_w = (m_{11} - m_{33})U \quad (337)$$

E M_w é a negativa do momento de Munk.

6.13.1.4 ROTAÇÃO DE 90° E DETERMINAÇÃO DAS DERIVADAS DO PLANO VERTICAL

Lembrando-se que o estudo do plano horizontal tem recebido a atenção de grande número de pesquisadores, sobretudo japoneses, e que hoje se encontram disponíveis muitos resultados experimentais, seria interessante poder-se fazer uso das conclusões do plano horizontal para o plano vertical, mormente no cálculo das derivadas hidrodinâmicas.

Para extrapolação dos resultados do plano horizontal para plano vertical propõe-se um artifício que consiste em rotacionar o navio em 90°.

Dessa forma, toda riqueza de detalhes da teoria potencial de faixas tradicionalmente utilizada pode ser reaproveitada. A Figura 137 ilustra o procedimento para uma baliza típica de submarino:

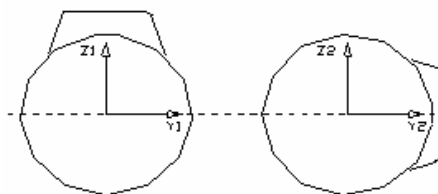


Figura 137 - Baliza rodada de 90°

A rotação de 90° entende as novas de dimensões do navio como na Figura 138, onde aparece a interpretação do navio como uma asa de pequena razão de aspecto, necessária ao cálculo para Z'_w , com L-comprimento(corda), B-boca (envergadura) e D-pontal ou dimensão mais significativa do casco nessa direção (espessura):

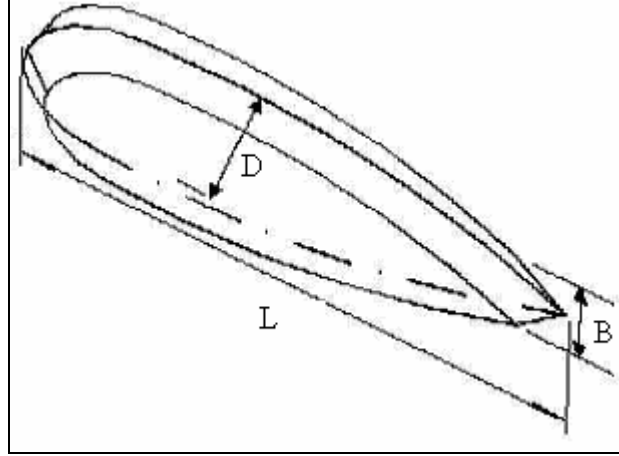


Figura 138 -Navio como asa de pequena razão de aspecto no plano vertical

Apesar de a rotação de 90° parecer fora de propósito, Gueler (1983) apresenta a hipótese de axissimetria, o que leva a praticamente ao mesmo procedimento, mas não consegue incorporar as sutilezas da forma hidrodinâmica.

Gueler (1983) estudou o Oberon que tem formato semelhante aos navios da 2ª. Guerra. A hipótese de axissimetria prestou-se bem ao cálculo hidrodinâmico, apesar de as formas do Oberon fugirem muito às formas de um corpo axissimétrico.

A rotação de 90° conduz à utilização dos seguintes resultados (que consideram a teoria de asas, as parcelas potenciais e de separação):

$$(Z'_w)_h = \frac{-\pi B}{2L} + (C_d)_h \quad (338)$$

$$(Z'_q)_h = -k_1 m' + \frac{x_p}{L} (Z'_w)_h \quad (339)$$

$$(M'_w)_h = -(m'_{33} - k_1 m') + \frac{x_p}{L} (Z'_w)_h \quad (340)$$

$$(M'_q)_h = -k' m' \frac{x_l}{L} + \left(\frac{c_p}{2} \right)^2 (Z'_w)_h \quad (341)$$

onde k_1 , k' estão definidos no item 6.16 e m_{22} é a massa adicional nessa direção.

A rotação de 90° também permite adaptar os valores empíricos de Clarke Gedling e Hine (1982):

$$(Z'_w)_h = -\frac{\pi B}{2L} \left[1 + 0.4 C_B \frac{2D}{B} \right] \quad (342)$$

$$(Z'_q)_h = -\frac{\pi B}{2L} \left[-\frac{1}{2} - 0.08 \frac{2D}{B} + 2.2 \frac{D}{2L} \right] \quad (343)$$

$$(M'_w)_h = -\frac{\pi B}{2L} \left[\frac{1}{2} + 2.4 \frac{B}{2L} \right] \quad (344)$$

$$(M'_q)_h = -\frac{\pi B}{2L} \left[\frac{1}{4} + 0.039 \frac{2D}{B} - 0.56 \frac{D}{L} \right] \quad (345)$$

Analogamente utilizando-se dos valores de Inoue et al. (1981) tem-se:

$$(Z'_w)_h = -\frac{\pi B}{2L} + 1.4 C_B \frac{D}{L} \quad (346)$$

$$(Z'_q)_h = -\frac{\pi B}{4L} \quad (347)$$

$$(M'_w)_h = -\frac{B}{L} \quad (348)$$

$$(M'_q)_h = \left(\frac{B}{L} \right)^2 - 0.54 \frac{B}{L} \quad (349)$$

6.13.1.5 ANALOGIA COM UMA ASA E DEMAIS DERIVADAS DE VELOCIDADE

Empregando as formulações simples apresentadas por Norrbin (1971) e rodando de 90° os corpos pode-se facilmente derivar as seguintes expressões:

No plano horizontal submerso, tem-se:

$$(Z'_w)_h = -\frac{\pi}{2} AR = -\pi \frac{B}{2L} \quad (350)$$

$$(Z'_q)_h = \frac{\pi}{4} AR = \frac{\pi B}{4L} \quad (351)$$

$$(M'_w)_h = -\frac{\pi}{4} AR = -\frac{\pi}{4} \frac{B}{L} \quad (352)$$

$$(M'_q)_h = -\frac{\pi}{8} AR = -\frac{\pi}{8} \frac{B}{L} \quad (353)$$

onde $AR=B/L$, para o plano horizontal na superfície.

6.14 RESUMO DO CÁLCULO DE DERIVADAS HIDRODINÂMICAS DE VELOCIDADE

Apresenta-se um resumo para a estimativa das derivadas hidrodinâmicas de velocidade as de maior importância, pois compõem os índices de estabilidade:

Tabela 100 – Resumo de derivadas de velocidade no plano horizontal, na superfície

	Teoria de Corpos Esbeltos	Escoamento Potencial	Lewis (1989)	Elipsóide Equivalente
Y_v	$-U C_{s_T}$	0	$-\frac{1}{2} \rho L T U \left[\frac{\partial C_L}{\partial \alpha} + C_D \right]$	0
Y_r	$-U x_T C_{s_T}$	$-U m_{11}$	$-U m_{11} + x_p Y_v$	0
N_v	$U(m_{22} + x_T C_{s_T})$	$U(m_{11} - m_{22})$	$U(m_{11} - m_{22}) + x_p Y_v$	$U(m_{11} - m_{22})$
N_r	$U(m_{26} - x_T^2 C_{s_T})$	$U m_{26}$	$U k' m + Y_v (L c_p / 2)^2$	0

onde o subíndice T significa última seção (de *tail*, cauda), m_{11} é a massa adicional na direção 1 por um movimento em 1, m_{22} é a massa adicional na direção 2 por um movimento em 2, k' é o coeficiente de acessão de inércia em rotação, C_s é o coeficiente de massa adicional seccional na direção 22, na ordenada x_T (abscissa da cauda) e x_p é a posição do centro de pressão a partir da seção mestra e, finalmente, $\frac{\partial C_L}{\partial \alpha}$ é o coeficiente angular do coeficiente de sustentação da asa.

Note-se que a razão de aspecto do navio é $2T/L$, dobrada com relação à razão de aspecto real, enquanto que a área do fólio-navio não é dobrada (plano horizontal na superfície).

Analogamente ao que se passa no plano horizontal, esse é o resumo das derivadas de velocidade no plano vertical. A Tabela 101 apresenta essas derivadas no plano vertical.

Tabela 101 – Resumo de derivadas de velocidade no plano vertical

	Teoria de Corpos Esbeltos	Escoamento Potencial	Lewis (1989)	Elipsóide Equivalente
Z_w	$-U C_{s_T}$	0	$-\frac{1}{2} \rho L B U \left[\frac{\partial C_L}{\partial \alpha} + C_D \right]$	0
Z_q	$-U x_T C_{s_T}$	$-U m_{11}$	$-U m_{11} + x_p Z_w$	0
M_w	$U(m_{33} + x_T C_{s_T})$	$U(m_{11} - m_{33})$	$U(m_{11} - m_{33}) + x_p Z_w$	$U(m_{11} - m_{33})$
M_q	$U(m_{35} - x_T^2 C_{s_T})$	$U m_{35}$	$U k' m + Z_w (L c_p / 2)^2$	0

Onde o subíndice T significa última seção (de *tail*, cauda). m_{11} é a massa adicional na direção 1 por um movimento em 1, m_{33} é a massa adicional na direção 3 por um

movimento em 3, k' é o coeficiente de acessão de inércia em rotação, C_s é o coeficiente de massa adicional seccional na direção 33, na ordenada x_T (abscissa da cauda) e x_p é a posição do centro de pressão a partir da seção mestra e, finalmente, $\frac{\partial C_L}{\partial \alpha}$ é o coeficiente angular do coeficiente de sustentação da asa.

Apesar de a aproximação por um elipsóide equivalente ser ruim para as derivadas de estabilidade e, portanto, para o cálculo do raio de giro, as massas adicionais podem ser calculadas facilmente para o elipsóide que equivale ao navio, como em Fossen (1994). Uma alternativa é se utilizar Inoue et al. (1981) ou Clarke, Gedling e Hine (1982).

A teoria de corpos esbeltos e a teoria de asas de pequena razão de aspecto chegam aos mesmos resultados, quando se faz a aproximação proposta por Bohlmann (1989) que integra o corpo esbelto até a seção de maior boca.

6.15 DISCUSSÃO SOBRE A TEORIA DE FAIXAS E CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

As derivadas hidrodinâmicas de velocidade apresentadas sob essa denominação são dependentes do ponto de aplicação da derivada Y_v' .

O erro no cálculo de Y_v' é carregado para todas as demais derivadas de velocidade, assim como no caso das derivadas apresentadas por Norrbin (1971). Caso se corrija Y_v (Z_w) pode-se obter com precisão algumas das outras derivadas. Tenta-se mostrar isso com o estudo do dirigível R-38(ZR-2), cujas características estão apresentadas na pp. 19-13 de Hoerner (1975). Esse dirigível é um corpo de revolução com $L/D=8.2$, cuja superfície lateral se encontra superposta à de um elipsóide com os mesmos eixos desse veículo na Figura 139.

Definindo-se x_m como o braço a partir do centro de gravidade do corpo, positivo para montante, N_{vMunk} como a parcela de N_v decorrente apenas do momento de Munk, e Y_{vJones} como a derivada Y_v com base na teoria de asas de pequena razão de aspecto, tem-se:

$$\frac{x_m}{L} = \frac{(N_v')_{Munk}}{(Y_v')_{Jones}} \quad (354)$$

Analogamente para os resultados experimentais, $x_{experimental}$ é o braço a partir do centro de gravidade da força de sustentação:

$$\frac{x_{experimental}}{L} = \frac{(N_v')_{experimental}}{(Y_v')_{experimental}} \quad (355)$$

Igualando os momentos experimentais e ideais:

$$(Y_v')_{Jones} (x_m + x_p) = (Y_v')_{experimental} x_{experimental} \quad (356)$$

O que dá para o braço do momento de separação:

$$\frac{x_p}{L} = \frac{(Y_v')_{Jones} x_{experimental} - x_m (Y_v')_{ideal}}{(Y_v')_{Jones}} \quad (357)$$

Comparando a expressão acima como aquela proposta por Gueler (1983), ou seja a integração da área lateral, apresentou-se o erro de 4%.



Figura 139 – Área projetada do dirigível R-38(ZR-2), superposto a um elipsóide sombreado.

6.16 CÁLCULO DAS MASSAS ADICIONAIS

As massas adicionais de veículos submersos e na superfície, em baixas velocidades, são calculadas pelos seguintes métodos:

- (i) teoria de faixas;
- (ii) elipsóide equivalente;
- (iii) teoria de corpos esbeltos.

A teoria de faixas parte de valores bidimensionais e os integra ao longo do navio. Para o cálculo das massas adicionais seccionais, tem-se ($i, j=1, \dots, 6$):

$$a_{ij} = \int_S \phi_i \frac{\partial \phi_j}{\partial n} dS \quad (358)$$

onde ϕ é o potencial de velocidades nas direções i e j , n é a direção normal à superfície S da figura bidimensional, e i e j são as direções dadas pela Figura 140.

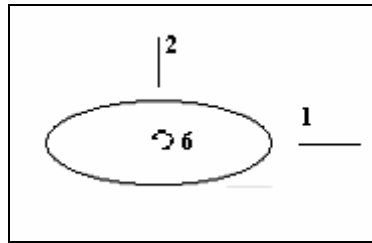


Figura 140 – Direções i e j da massa adicional a_{ij}

Dessa forma tem-se para as massas adicionais, do navio, utilizando-se a teoria de faixas:

$$-X_{\dot{u}} = \int a_{11}(x) dx \quad (359)$$

$$-Y_{\dot{v}} = \int a_{22}(x) dx \quad (360)$$

$$-Z_{\dot{w}} = \int a_{33}(x) dx \quad (361)$$

$$-K_{\dot{p}} = \int a_{44}(x) dx \quad (362)$$

$$-M_{\dot{q}} = \int a_{55}(x) dx \quad (363)$$

$$-N_{\dot{r}} = \int a_{66}(x) dx \quad (364)$$

O método do elipsóide equivalente, já explicado, considera a massa adicional do corpo igual à massa adicional do elipsóide equivalente ao corpo. Aqui apresenta-se o caso de elipsóide de revolução:

$$-X_{\dot{u}} = \frac{-\alpha_0}{2-\alpha_0} m \quad (365)$$

$$-Y_{\dot{v}} = \frac{-\beta_0}{2-\beta_0} m \quad (366)$$

$$Z_{\dot{w}} = Y_{\dot{v}} \quad (367)$$

$$K_{\dot{p}} = 0 \quad (368)$$

$$M_{\dot{q}} = -\frac{1}{5} \frac{(b^2 - a^2)(\alpha_0 - \beta_0)}{2(b^2 - a^2) - (b^2 + a^2)(\alpha_0 - \beta_0)} m \quad (369)$$

$$N_{\dot{r}} = M_{\dot{q}} \quad (370)$$

onde m é massa do elipsóide, dada por:

$$m = \frac{4}{3} \pi \rho a b^2 \quad (371)$$

e α_0 e β_0 por:

$$\alpha_0 = \frac{2(1-e^2)}{e^3} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+e}{1-e} \right) - e \right] \quad (372)$$

$$\beta_0 = \frac{1}{e^2} - \frac{1-e^2}{2e^3} \ln \left(\frac{1+e}{1-e} \right) \quad (373)$$

e e é a excentricidade definida por:

$$e = 1 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \quad (374)$$

Finalmente a massa adicional dada pela teoria de corpos esbeltos leva a mesma definição das equações da teoria de faixas (veja-se item 6.11), mas a massa bidimensional é calculada por essa teoria. Como se diz no item 6.11 a teoria de corpos esbeltos incorpora efeitos tridimensionais aos da teoria de faixas.

O coeficiente de acessão de inércia do elipsóide são relevantes para o cálculo das demais derivadas. Segundo Fossen (1994), Lamb (apud FOSSEN, 1994) os definiu da seguinte forma:

$$k_1 = \frac{\alpha_0}{2-\alpha_0} \quad (375)$$

$$k_2 = \frac{\beta_0}{2-\beta_0} \quad (376)$$

$$k' = \frac{(\beta_0 - \alpha_0)e^4}{(2 - e^2)[2e^2 - (2 - e^2)(\beta_0 - \alpha_0)]} \quad (377)$$

onde

$$m_{11} = k_1 m \quad (378)$$

$$m_{22} = k_2 m \quad (379)$$

$$m_{66} = k' I_{zz} \quad (380)$$

O PNA (LEWIS, 1989), por sua vez, oferece, um gráfico para o cálculo dos coeficientes de acessão de inércia do elipsóide com eixos $b=c$, cujas curvas transcreve-se aqui, através de regressão de mínimos quadrados, por serem mais adequadas à programação.

$$k' = 1.0692(b/a)^2 - 2.1049(b/a) + 1.0331 \quad (381)$$

com $R^2 = 0.9974$.

$$k_2 = 0.1907(b/a)^2 - 0.7078(b/a) + 1.005 \quad (382)$$

com $R^2 = 0.9991$.

$$k_1 = 0.1311(b/a)^2 + 0.3929(b/a) - 0.014 \quad (383)$$

com $R^2 = 0.9963$.

Para o navio de superfície o O PNA (LEWIS, 1989) recomenda utilizar-se $b=2T$ e $a=L$, para obtenção de k_1 , k_2 , k' .

Finalmente apresentam-se as massas adicionais propostas por Clarke, Gedling e Hine (1982) como valores empíricos à teoria de faixas:

$$(Y'_v)_h = -\frac{\pi T}{L} \left[1 + 0.16 C_B \frac{B}{T} - 5.1 \frac{B^2}{L^2} \right] \quad (384)$$

$$(Y'_r)_h = -\frac{\pi T}{L} \left[-0.0033 \frac{B^2}{T^2} + 0.67 \frac{B}{L} \right] \quad (385)$$

$$(N'_v)_h = -\frac{\pi T}{L} \left[-0.041 \frac{B}{T} + 1.1 \frac{B}{L} \right] \quad (386)$$

$$(N'_r)_h = -\frac{\pi T}{L} \left[\frac{1}{12} + 0.017 C_B \frac{B}{T} - 0.33 \frac{B}{L} \right] \quad (387)$$

Para o plano horizontal, submerso, de acordo com as mesmas hipóteses que servem a de base à extrapolação de derivadas de velocidade nos itens precedentes, fica-se com:

$$(Y'_v)_h = -\frac{\pi D}{2L} \left[1 + 0.16 C_B \frac{2B}{D} - 5.1 \frac{B^2}{L^2} \right] \quad (388)$$

$$(Y'_{\dot{r}})_h = -\frac{\pi D}{2L} \left[-0.0033 \frac{4B^2}{D^2} + 0.67 \frac{B}{L} \right] \quad (389)$$

$$(N'_{\dot{v}})_h = -\frac{\pi D}{2L} \left[-0.041 \frac{2B}{D} + 1.1 \frac{B}{L} \right] \quad (390)$$

$$(N'_{\dot{r}})_h = -\frac{\pi D}{2L} \left[\frac{1}{12} + 0.017 C_B \frac{2B}{D} - 0.33 \frac{B}{L} \right] \quad (391)$$

Para o plano vertical, submerso, utilizando-se a rotação de 90°, fica-se com:

$$(Z'_{\dot{w}})_h = -\frac{\pi B}{2L} \left[1 + 0.16 C_B \frac{2D}{B} - 5.1 \frac{D^2}{L^2} \right] \quad (392)$$

$$(Z'_{\dot{q}})_h = -\frac{\pi B}{2L} \left[-0.0033 \frac{4D^2}{B^2} + 0.67 \frac{D}{L} \right] \quad (393)$$

$$(M'_{\dot{w}})_h = -\frac{\pi B}{2L} \left[-0.041 \frac{2D}{B} + 1.1 \frac{D}{L} \right] \quad (394)$$

$$(M'_{\dot{q}})_h = -\frac{\pi B}{2L} \left[\frac{1}{12} + 0.017 C_B \frac{2D}{B} - 0.33 \frac{D}{L} \right] \quad (395)$$

6.17 SÉRIES DE DADOS EXPERIMENTAIS

Preliminarmente, descarta-se da comparação a formulação empírica oferecida por Jorgensen (apud TRIANTAFYLLOU E HOVER 2004) pelas razões que se desenvolvem a seguir. Jorgensen apresenta a seguinte formulação para o cálculo da sustentação de um corpo carenado:

$$C_L = \frac{A_b}{A_r} \sin 2\alpha \cos \frac{\alpha}{2} + \frac{A_p}{A_r} C_D \sin^2 \alpha \quad (396)$$

onde A_b é a área do corpo na seção de ré, A_p , a área projetada do corpo enquanto asa e A_r uma área de referência, ou seja um fator de adimensionalização.

Derivando com respeito a α

$$\frac{\partial C_L}{\partial \alpha} = \frac{A_b}{A_r} \left[2 \cos 2\alpha \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \sin \frac{\alpha}{2} \right] + 2 \frac{A_p}{A_r} C_D \sin \alpha \cos \alpha \quad (397)$$

Fazendo o ângulo de ataque igual a zero ($\alpha = 0$):

$$\frac{\partial C_L}{\partial \alpha} = 2 \frac{A_b}{A_r} \cos 2\alpha \cos \frac{\alpha}{2} = 2 \frac{A_b}{A_r} \quad (398)$$

Para um corpo axissimétrico com envergadura $2s$ e comprimento L , tem-se:

$$\frac{\partial C_L}{\partial \alpha} = 2 \frac{A_b}{A_r} = 2 \frac{\pi s^2}{sL} = 2 \frac{\pi s}{L} \quad (399)$$

Esse valor é o dobro dos resultados experimentais apresentados por Hoerner (1975) para cones e corpos ogivais, como também com a teoria das asas de pequena razão de aspecto.

De forma análoga se pode tratar dessa formulação para o caso dos momentos. Jorgensen apresenta a seguinte formulação para o cálculo do momento fluido:

$$C_M = \frac{\nabla - A_b(L - x_m)}{A_r L} \sin 2\alpha \cos \frac{\alpha}{2} + \frac{A_p}{A_r} C_D \frac{x_m - x_c}{L} \sin^2 \alpha \quad (400)$$

Supondo todos os termos constantes e derivando com respeito a α :

$$\frac{\partial C_M}{\partial \alpha} = \frac{\nabla - A_b(L - x_m)}{A_r L} \left[2 \cos 2\alpha \cos \frac{\alpha}{2} - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \sin \frac{\alpha}{2} \right] + 2 \frac{A_p}{A_r} \left(\frac{x_m - x_c}{L} \right) C_D \sin \alpha \cos \alpha \quad (401)$$

Fazendo o ângulo de ataque igual a zero ($\alpha = 0$):

$$\frac{\partial C_M}{\partial \alpha} = 2 \frac{\nabla - A_b(L - x_m)}{A_r L} \cos 2\alpha \cos \frac{\alpha}{2} = 2 \frac{\nabla - A_b(L - x_m)}{A_r L} \quad (402)$$

Para um cilindro de comprimento L e seção circular de raio b :

$$\frac{\partial C_M}{\partial \alpha} = 2 \frac{\nabla}{A_r L} = 2 \frac{\pi b^2 L}{\pi b^2 L} = 2 \quad (403)$$

Obtendo esse mesmo coeficiente através da expressão do momento de Munk para um cilindro de base circular com raio b e comprimento L :

$$\frac{\partial C_M}{\partial \alpha} = \frac{(m_{33} - m_{11})U^2}{\frac{1}{2}\rho U^2 S} = \frac{(\rho \pi b^2 - 0)U^2}{\frac{1}{2}\rho U^2 \pi b^2} = 2 \quad (404)$$

Igualmente, pensa-se que se pode descartar a formulação de Jorgensen para momentos. O motivo é que se apresenta valor igual ou maior que o obtido através do momento de Munk, desconsidera o arrasto na formulação para pequenos ângulos, donde, a formulação deve se prestar bem para ângulos maiores.

Outra referência disponível para comparação é a série de lemes de Balau (1976) que fornece o coeficiente de sustentação para lemes operando em escoamento uniforme através de uma regressão da forma:

$$C_L = 2\alpha (1.4 + AR) / 100 + (5.6 - 5AR)(\alpha^2 / 100) \quad (405)$$

onde coeficiente de sustentação do leme, AR - razão de aspecto, α ângulo do leme em graus.

Derivando com respeito a α

$$\frac{\partial C_L}{\partial \alpha} = 2(1.4 + AR) / 100 + 2(5.6 - 5AR)(\alpha / 100) \quad (406)$$

fazendo o ângulo de ataque igual a zero ($\alpha = 0$):

$$\frac{\partial C_L}{\partial \alpha} = \frac{2(1.4 + AR)}{100} = 0.127 \frac{\pi}{2} AR + 0.028 \quad (407)$$

Essa expressão permite comparar os valores obtidos pela série com os valores obtidos do método pelos demais métodos.

6.18 DERIVADAS HIDRODINÂMICAS DO LEME E RABETAS

A rabeta se comporta como uma asa de pequena razão de aspecto e nesse caso, aplica-se a ela a formulação de Jones (1946):

$$(Y'_v)_f = -\frac{\frac{1}{2}\rho U A_{rabeta} \frac{\pi}{2} AR}{\frac{1}{2}\rho U L T} = -\frac{\pi}{2} AR \left(\frac{A_{rabeta}}{L T} \right) \quad (408)$$

onde AR é a razão de aspecto da rabeta e A_{rabeta} é a área projetada da rabeta.

A razão de aspecto AR da rabeta é o dobro da razão de aspecto real, pois o navio comporta-se como um espelho para a rabeta.

Essa formulação permite obter-se a rabeta como uma porcentagem da área projetada do navio. Não há razões para se distinguir entre o plano vertical submerso e na superfície.

Analogamente, para o plano vertical

$$(Z'_w)_f = -\frac{\pi}{2} AR \left(\frac{A_{rabeta}}{L B} \right) \quad (409)$$

Para o leme opta-se pela série sistemática de Balau (1976). Nesse caso fica-se com:

$$Y_\delta = (2 (1.4 + AR) / 100) \left(\frac{A_{leme}}{L T} \right) \quad (410)$$

onde A_{leme} é a área do leme a partir da seção mestra

$$N_\delta = x_{leme} Y_\delta \quad (411)$$

onde x_{leme} é a posição do leme a partir da seção mestra, positiva para vante. Analogamente, no plano vertical, deve ser:

$$Z_\delta = 2 (1.4 + AR) / 100 \left(\frac{A_{leme}}{L B} \right) \quad (412)$$

$$M_\delta = x_{leme} Z_\delta \quad (413)$$

6.19 DISCUSSÃO SOBRE O MÉTODO DE CÁLCULO MAIS APROPRIADO

Uma conclusão importante que se pode tirar da observação dos itens 6.5 e 6.15 é que as derivadas de velocidade para o plano vertical podem ser entendidas como dependentes de massas adicionais e de Z_w , enquanto que, no plano horizontal, de massas adicionais e de Y_v .

As massas adicionais, não importando a forma de cálculo, são obtidas sempre através da integração das massas adicionais seccionais, exceto no caso do elipsóide equivalente, de forma que de antemão esta é a forma que incorpora o menor nível de detalhes.

A discussão sobre a forma de obtenção das massas adicionais não tem suscitado dúvidas, enquanto que para as derivadas de velocidade há métodos que se alternam.

Para as demais derivadas, o método de cálculo mais apropriado é o que apresenta melhor aderência aos resultados experimentais, a maior generalidade e, em último caso a maior simplicidade.

Resultados experimentais são raramente publicados para navios e menos ainda para submarinos, de forma que não existe um único submarino que tenha sido completamente fixado desde a apresentação de suas formas até o resultados de suas derivadas hidrodinâmicas.

Existe, contudo, alguma literatura referente a dirigíveis do tipo Zeppelin que podem fornecer dados relevantes de derivadas como Z_w e Y_v . Além disso, há os dados referente às fuselagens de um grande número aeronaves e seus flutuadores.

Nesse quadro, comparam-se alguns valores de navios e dirigíveis com os métodos anteriormente apresentados, de modo a se escolher o que apresenta os menores erros.

Compara-se também o método das malhas de vórtices (VLM) por se apresentar como uma solução rápida para a obtenção das derivadas Y_v e Z_w .

O VLM é primeiramente comparado com a Série de Lemes de Balau (1976) em que, lamentavelmente, não apresenta aderência, na medida em que se diminui a razão de aspecto. Ficam descartados os valores que se obtém desse método para o cálculo de Y_v do navio, seja na condição submersa ou na superfície.

O VLM serve, entretanto, além de mera ilustração, como uma ferramenta para a avaliação qualitativa da contribuição do coeficiente de sustentação das asas inferior e superior do da divisão idealizada do submarino, no item 6.12.1.3.2.

É avaliada também a Série de Lemes de Balau (1976) que apresenta como um resultado secundário uma função que imprime o efeito da espessura do fólio ao coeficiente de sustentação do leme.

Noutro item, avalia-se Bohlmann (1989) que recomenda acrescentar-se ao valor obtido para Z_w da teoria de corpos esbeltos a função de espessura de Hoerner (1975).

Por analogia ao raciocínio de Bohlmann (1989), entende-se que o efeito de espessura, que para Y_v corresponde à boca do navio, deveria ser acrescentado aos valores de Y_v . Nesse trabalho se comparam o efeito de espessura oferecido por Hoerner (1975) e prefere-se descartar a função de espessura.

Assim o procedimento adotado para a estimativa das características de manobra da versão V2A passa pela definição da melhor estimativa das já apresentadas (teoria de faixas, elipsóide, etc) em que se tornam caminho crítico:

- a. exposição do método da malha de vórtices;
- b. cálculo da sustentação do leme pelo VLM;
- c. cálculo das derivadas pelas várias metodologias

Cabe ressaltar que, para avaliar a aderência aos dados experimentais, como o perfil submerso do navio não é normalmente fornecido, opta-se por estimá-lo pelo produto LT.

6.19.1 VORTEX LATTICE METHOD - VLM (MÉTODO DA MALHA DE VÓRTICES)

Utilizou-se um programa CFD, com base em VLM, da autoria de Sovieiro e Wanderley (1991), para asas simétricas, de forma a comparar a teoria utilizada e métodos CFD.

O programa de Soviero e Wanderley (1991) foi desenvolvido para asas simétricas e de grande razão de aspecto. Dessa forma, consistiu trabalho da tese, outrossim, a extensão do programa para o cálculo de asas assimétricas e sua validação para asas de pequena razão de aspecto.

O programa trabalha com o VLM que é um método CFD de ampla aceitação no meio aeronáutico e se adequa bem à teoria que se procura aqui testar, pois calcula sustentação.

No VLM trabalha-se com campos de velocidades que são dados por velocidades induzidas por linhas de vórtices e pelo escoamento uniforme sobre a asa. A

lei de Biot-Savart permite calcular essas velocidades induzidas por cada linha de vórtices no fluido.

$$dV = \frac{\Gamma}{4\pi} \frac{dl \wedge r}{|r|^3} \quad (414)$$

onde Lei de Biot-Savart, V - velocidade induzida e Γ é a circulação dos vórtices, r é a distância do vórtice ao ponto de interesse de cálculo da velocidade

A força de sustentação de uma asa é então calculada dividindo-a num grande número de linhas de vórtice em ferradura. Cada painel induz uma vorticidade que satisfaz a condições de contorno permitindo montar uma matriz com os m painéis (onde a_{ij} são suas influências uns nos outros).(SZYMENDERA, 2002).

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ a_{31} & a_{32} & \cdots & a_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{11} & \cdots & a_{mm} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Gamma_1 \\ \Gamma_2 \\ \Gamma_3 \\ \vdots \\ \Gamma_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} RHS_1 \\ RHS_2 \\ RHS_3 \\ \vdots \\ RHS_m \end{pmatrix} \quad (415)$$

onde os coeficientes de influência a_{ij} são obtidos por:

$$a_{ij} = \frac{1}{4\pi} \int \left(\frac{dl_i \wedge r_{ij}}{|r_{ij}|^3} \right) \quad (416)$$

A condição de contorno para o painel k é (onde n_k é a normal ao painel):

$$RHS_k = [u, v, w]_k \cdot n_k \quad (417)$$

Finalmente a força passa a ser o *lift* produzido em cada painel, k:

$$L_K = \rho U_K \Gamma_K \quad (418)$$

A Figura 141 ilustra o raciocínio com m painéis:

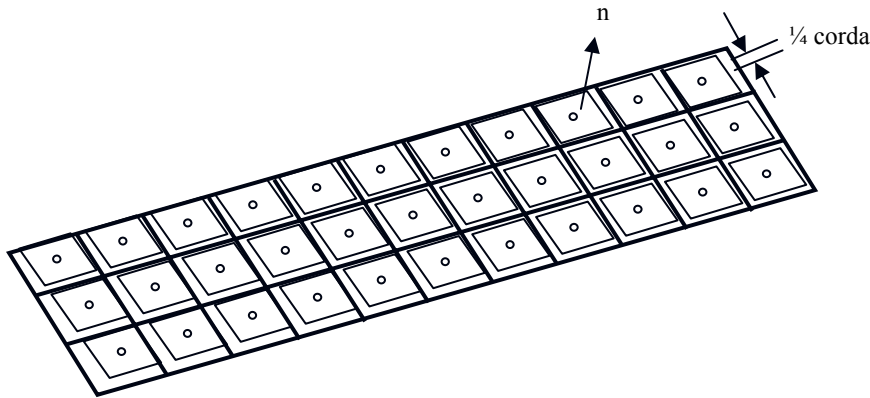


Figura 141 – Malha com vórtices adaptado de Szymendera (2002)

6.19.2 MÉTODO DAS MALHAS DE VÓRTICES E SÉRIES DE LEMES (BALAU,1976)

Aqui se apresenta apenas o erro entre o Método das Malhas de Vórtice (sem espessura) com séries de lemes de Balau (1976), também sem espessura, no cálculo do coeficiente de sustentação dos lemes da série.

$$\delta_i = \frac{(C_L)_{VLM} - (C_L)_{Balau}}{(C_L)_{Balau}} \quad (419)$$

onde δ_i é o erro da derivada $(C_L)_{VLM}$, obtida pelo método da malha de vórtices e $(C_L)_{Balau}$ e o valor dado pela série sistemática de Balau (1976).

Tabela 102- VLM x Séries de Lemes com espessura zero

	Razão de Aspecto do Leme					
ângulo°/AR	0.75	1	1.5	2	2.5	3
0	13%	4%	-1%	1%	5%	10%
1	13%	4%	-1%	0%	4%	9%
2	14%	4%	-2%	-1%	3%	8%
3	14%	5%	-2%	-1%	3%	7%
4	14%	5%	-2%	-2%	2%	6%
5	15%	5%	-3%	-3%	1%	5%
6	15%	5%	-3%	-3%	0%	4%
7	15%	5%	-3%	-4%	-1%	3%
8	16%	5%	-4%	-5%	-2%	2%
9	0%	5%	0%	0%	0%	0%
10	0%	0%	0%	0%	0%	0%

Como se pode perceber a série começa a se desviar dos valores experimentais na medida em que a razão de aspecto cai.

Para uma asa de razão de aspecto 0.1, o VLM apresenta coeficientes de sustentação 10 vezes maiores que a formulação de Jones (1946). Isso ocorre, porque as razões de aspecto pequenas começam a apresentar efeitos tridimensionais que deterioram os resultados do método.

6.19.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS EFEITOS DE ESPESSURA DE HOERNER (1975) E BALAU (1976)

Comparam-se o ajuste em virtude da espessura nos coeficientes de sustentação e arrasto propostos por Hoerner (1975) com o de Balau (1976).

O Balau (1976) recomenda a multiplicação pelo coeficiente de espessura de forma a se obter o valor para espessuras diferentes de 0:

$$k=0.56+3.8(t/c)-5.7(t/c)^2 \quad (420)$$

onde k é o multiplicador para espessura, t/c razão espessura corda.

Em Bohlmann (1989), encontra-se a sugestão de inclusão do efeito da espessura no cálculo da derivada de velocidade Z_w . Esse efeito é acrescentado também através de uma função espessura k que deve ser multiplicada à derivada:

$$k = e^{-1.7(t/c)}; \text{se } t/c \geq 0.5 \quad (421)$$

$$k = 1 - 0.005e^{-9.5(t/c)}; \text{se } t/c < 0.5 \quad (422)$$

No gráfico da Figura 142 são plotados no eixo vertical os valores das espessuras de Hoerner (1975) e Balau (1976) em função do inverso da razão de espessura, razão L/D , ou seja, comprimento sobre diâmetro, nos valores comumente encontrados nos submarinos, abrangendo o híbrido, $L/D \sim 5.6$.

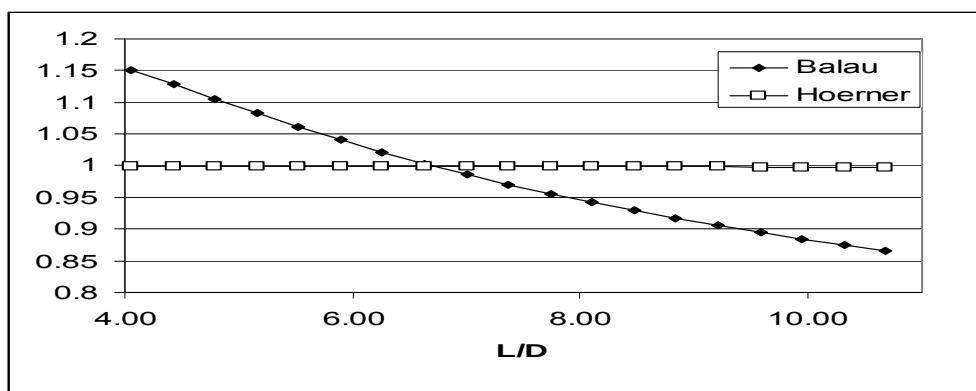


Figura 142- Efeito de Espessura para dois corpos

Parece mais razoável empregar-se a correção de espessura oferecida por Balau, mesmo que sua regressão tenha sido tomada para razões de aspecto entre 0.75 e 3, pois apresenta variação na faixa útil enquanto o multiplicador de Hoerner (1975) parece constante igual 1, ou seja, a correção não indica correção nenhuma, em face do nível de erro que essa estimativa trabalha.

A validade de Hoerner (1975) parece, então, prejudicada pelo número de Reynolds, pois seus ensaios se deram com Reynolds próximo a 10^{-5} . Nesse caso, portanto, a presente recomendação contraria Bohlmann (1989). A Tabela 103 apresenta as espessuras que devem ser utilizadas na função de espessuras k :

Tabela 103 - Espessuras

	t	t/c
Plano vertical	D	D/L
Plano horizontal Submerso	B	B/L
Plano horizontal na superfície	B	B/L

6.19.4 COMPARAÇÃO DAS FORMULAÇÕES OFERECIDAS COM DADOS EXPERIMENTAIS

A literatura oferece alguns dados experimentais que possibilitam a validação dos métodos para o cálculo de derivadas hidrodinâmicas.

Assim os valores são calculados para o plano horizontal na superfície, horizontal submerso e vertical.

A Tabela 104 apresenta os dados de entrada, para os navios utilizados para escolha do método no plano horizontal na superfície:

Tabela 104 – Dados experimentais para comparação na superfície

	Tanker¹	Container²	Mariner²
Δ	95000	21222	18541
Lpp	222	175	160.93
B	42	25.4	23.17
T	14.2	8.5	8.23
Yv	-0.316	-0.23882	-0.2268
Yr	-0.029	-0.04982	-0.0976
Nv	-0.135	-0.07936	-0.0516
Nr	0.052	-0.04571	-0.0325

Fontes: 1- Yoshimura (2001), 2- Fossen (1994).

A Tabela 105 apresenta os dados de entrada, para os corpos utilizados para escolha do método no plano horizontal na superfície. As colunas com os números 2,3,4 representam os corpos da Figura 143, obtidos de Hoerner (1975), a partir dos dados de Liddell (1942). R-38(Z-2) é um dirigível Zeppelin e 107-K, um flutuador.

Tabela 105 – Dados experimentais para comparação na condição submersa

	R-38 (ZR-2)¹	2¹	3¹	4¹	107-K²
Δ	72604	0.0177	0.0177	0.01749	0.06769
Lpp	211.5312	1.397	1.397	1.397	2.03835
B	25.6032	0.127	0.127	0.127	0.21914
T	25.6032	0.127	0.127	0.127	0.25781
Yv	-0.0859435	-0.1406	-0.1667	-0.1615	-0.163

Fontes: 1- Hoerner (1975), 2- Liddell (1942).

Os valores experimentais apresentados para as derivadas no plano vertical, referem-se apenas a Z_w , isso advém do fato de que a força lateral que se apresenta é, de fato, a força de sustentação desses veículos. Como esses corpos são axissimétricos $Y_v = Z_w$, exceto para o flutuador, 107-K apresentado na Figura 147 e na Figura 148, já comparado às linhas da versão V2A, sombreada.

A escolha do método apropriado se faz através de dois critérios:

- (i) generalidade da expressão;
- (ii) menor desvio médio quadrático;
- (iii) no empate, o método mais simples.

Tabela 106 – Desvios das formulações com relação às derivadas de velocidade (na superfície)

	Método	Tanker	Container	Mariner	μ_Q	Eleito
Yv'	Jones = SB	-36%	-36%	-29%	12%	X
Yv'	Jones+Esp	-50%	-53%	-48%	25%	
Yv'	Balau	-654%	-818%	-859%	6118%	
Yv'	Norrbin	-36%	-36%	-29%	12%	
Yv'	Clarke	16%	6%	18%	2%	
Yv'	Inoue	22%	11%	23%	4%	
Yr'	Jacobs	-89%	-98%	-99%	91%	
Yr'	Norrbin	-446%	-253%	-182%	989%	
Yr'	Clarke	122%	29%	-33%	56%	X
Yr'	Inoue	246%	53%	-18%	213%	
Nv'	Jacobs	72%	83%	198%	171%	
Nv'	Norrbin	-26%	-4%	-18%	3%	X
Nv'	Clarke	-3%	19%	3%	1%	
Nv'	Inoue	-5%	22%	5%	2%	
Nr'	Jacobs	-197%	-17%	24%	132%	
Nr'	Norrbin	-197%	-17%	-59%	141%	X
Nr'	Clarke	-200%	-5%	-54%	143%	
Nr'	Inoue	-201%	-6%	-54%	145%	

Onde Inoue corresponde ao valor obtido através das formulações de Inoue (1981) apresentadas nos itens precedentes, e analogamente, Clarke para Clarke, Gedling e Hine (1982), Jones, Jones (1946), Jones +Esp , Jones (1946) com acréscimo da espessura de Balau (1976), Balau significa a aplicação do coeficiente de sustentação de lemes de Balau (1976) ao navio entendido como leme, Jones = SB representa a formulação de Jones (1946) que é idêntica à formulação de Newman (1977), corpos esbeltos. Finalmente Jacobs, refere-se a Jacobs (1964).

Os desvios são calculados com relação aos valores experimentais, da seguinte forma, nesse caso exemplificado com relação a Y_v' :

$$\delta_i = \frac{(Y_v')_i - (Y_v')_e}{(Y_v')_e} \quad (423)$$

onde δ_i é o erro da derivada $(Y_v')_i$ é obtida pelo método para o navio i e $(Y_v')_e$ obtida experimentalmente, para o navio i.

O cálculo dos desvios para as demais derivadas de velocidade avaliadas é análogo.

O desvio médio quadrático é calculado da seguinte forma:

$$\mu_Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\delta_i)^2 \quad (424)$$

onde μ_Q é a média quadrática dos erros, n é o número de valores experimentais.

Como se explicou anteriormente, Clarke, Gedling e Hine (1982) e Inoue (1981) apresentam ajustes empíricos aos valores teóricos, enquanto que Jones (1946) refere-se a asas de pequena razão de aspecto, da mesma forma que Norrbin(1971).

O método de Jacobs(1964) foi calculado considerando-se $x_p=0$, por falta de informações e desprezando-se a parcela relativa a c_p , o que o aproxima dos valores experimentais.

Omitiu-se o cálculo pela teoria de corpos esbeltos de Newman (1977)¹², porque esse cálculo apresenta formulação idêntica ao de uma asa com dimensões LT, LD ou LB, conforme o plano, horizontal, horizontal submerso e vertical, e já aparece nas linhas Norrbin (1971).

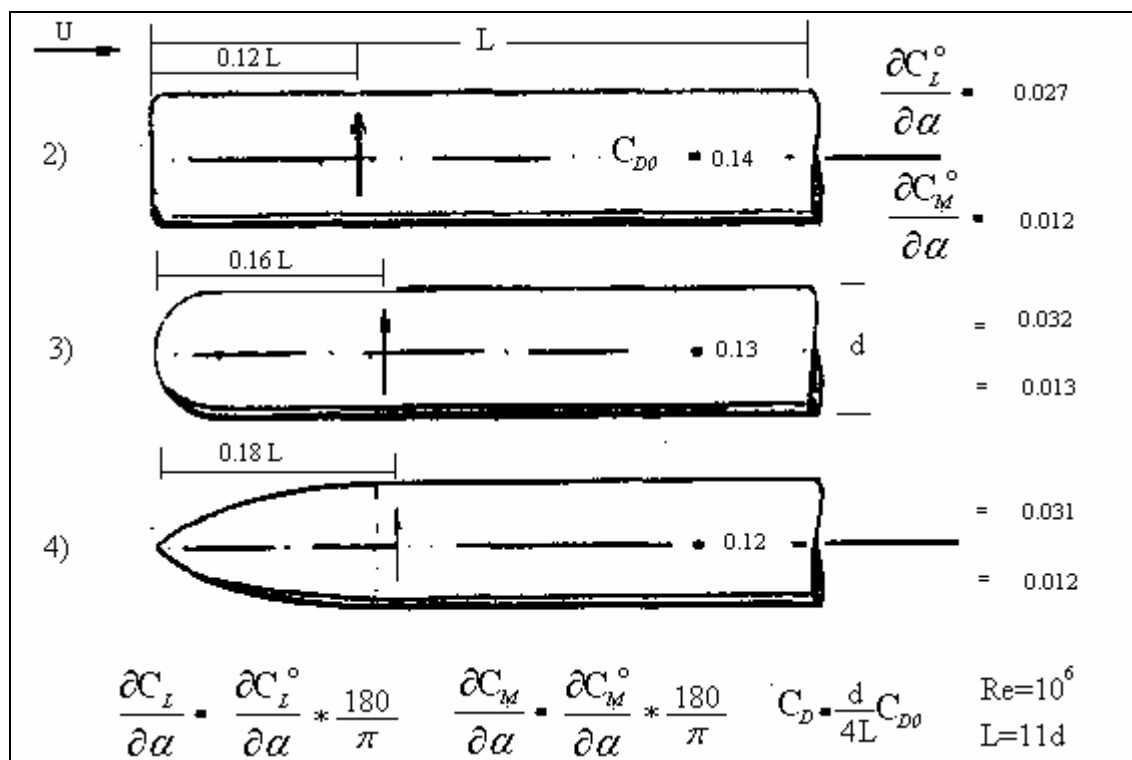


Figura 143 – Corpos Axissimétricos seus C_d , C_L , C_M e ponto de aplicação da sustentação (adaptado de Hoerner (1976), pp 19-8)

¹² na forma simplificada da teoria de corpos esbeltos aqui desenvolvida

A escolha pelo desvio médio quadrático se dá porque os valores calculados teoricamente ora se afastam para cima, ora para baixo do valor experimental.

Na Tabela 107, plano horizontal submerso e Tabela 108, vertical, o valor correspondente ao dirigível (R-38) ZR-2 foi excluído da média. Esse corpo não apresenta descolamento de camada na proa e portanto sua derivada Y_v' é muito menor que o valor previsto pela teoria de asas, e o veículo é muito mais instável.

Tabela 107 – Desvios das formulações com relação a Y_v' (submerso)

Métodos	R-38 (ZR-2) ¹	2	3	4	107-K	μ_Q	Escolhido
Jones	121%	2%	-14%	-12%	22%	2%	X
Jones+Esp	107%	-13%	-26%	-24%	16%	4%	
SB	-100%	2%	-14%	-12%	-49%	7%	
Clarke	214%	65%	40%	43%	71%	32%	
Inoue	224%	73%	46%	50%	76%	39%	

1- excluído do cálculo da média quadrática.

O (R-38) ZR-2 introduz um erro considerável na média se acrescentado, o que dificulta a avaliação dos métodos, logo se julga razoável retirá-lo do processo. Em corpos de proa rombuda, recomenda-se utilizar valores experimentais ou a teoria de corpos esbeltos de Newman (1977) que apresenta desvios menores.

Tabela 108 – Desvios das formulações com relação a Z_w'

	R-38 (ZR-2) ^{1,2}	2 ²	3 ²	4 ²	107-K ²	μ_Q	Escolhido
Jones	121%	2%	-14%	-12%	-21%	1%	X
Jones+Esp	107%	-13%	-26%	-24%	-28%	4%	
SB	-100%	2%	-14%	-12%	-67%	8%	
Clarke	214%	65%	40%	43%	23%	23%	
Inoue	224%	73%	46%	50%	28%	29%	

1- excluído do cálculo da média quadrática.

2-As colunas R-38 (ZR-2), 2, 3 4são idênticas para Y_v e Z_w , pois esses corpos são axissimétricos.

Pelo exposto, escolhe-se para o cálculo de derivadas hidrodinâmicas a idealização do navio como uma asa de pequena razão de aspecto (NORRBIN, 1971)¹³ que concorda com os valores obtidos pela teoria de corpos esbeltos (NEWMAN, 1977) quando aplicada a uma placa plana para todas as derivadas de velocidade.

Para o cálculo da derivada Y_r' na superfície, entretanto, opta-se por se utilizar a formulação de Clarke, Gedling e Hine (1982), pois os valores das demais estimativas

são muito ruins, e, por outro lado, Clarke, Gedling e Hine (1982) aproximam-se bem do navio-contêiner, cujo coeficiente de bloco é próximo daquele da versão V2A.

Para N_v' , na superfície, apesar de os valores de Clarke, Gedling e Hine (1982) apresentarem os menores desvios com relação aos dados experimentais, referem-se a navios de deslocamento, cujas formas não se assemelham à versão V2A, por isso, pensa-se que falta a generalidade suficiente às formulações desses autores, portanto opta-se também Norrbin (1971).

Para N_r' , na superfície, opta-se pelas formulações de Norrbin (1971), que apresentam resultados ligeiramente piores que as de Jacobs (1964), porque se tratam de formulações muito mais simples.

¹³ para Y_v' e Z_w' Norrbin (1971) reproduz Jones (1946).

6.20 CRITÉRIOS DE MANOBRABILIDADE

Critérios definem:

- (i) Testes;
- (ii) Condições em que se realizam esses testes;
- (iii) Índices a serem obtidos nesses testes.

De forma geral, os critérios têm levado em conta a capacidade de as embarcações atenderem determinada prova. Clarke Gedling e Hine (1982) propõem um critério que envolva um sistema como o da Figura 144, muito abrangente, mas não apresenta nenhuma modelagem do ambiente que envolve a embarcação.

Conhece-se até hoje normas de navios de superfície para embarcações maiores de 100 m (Norma A751). Considera-se, então, a base de extrapolação para o critério segurança. A segurança é uma qualidade de difícil medida. Portanto, um aspecto externo, seria sua detecção (variável *proxy* dessa medida).

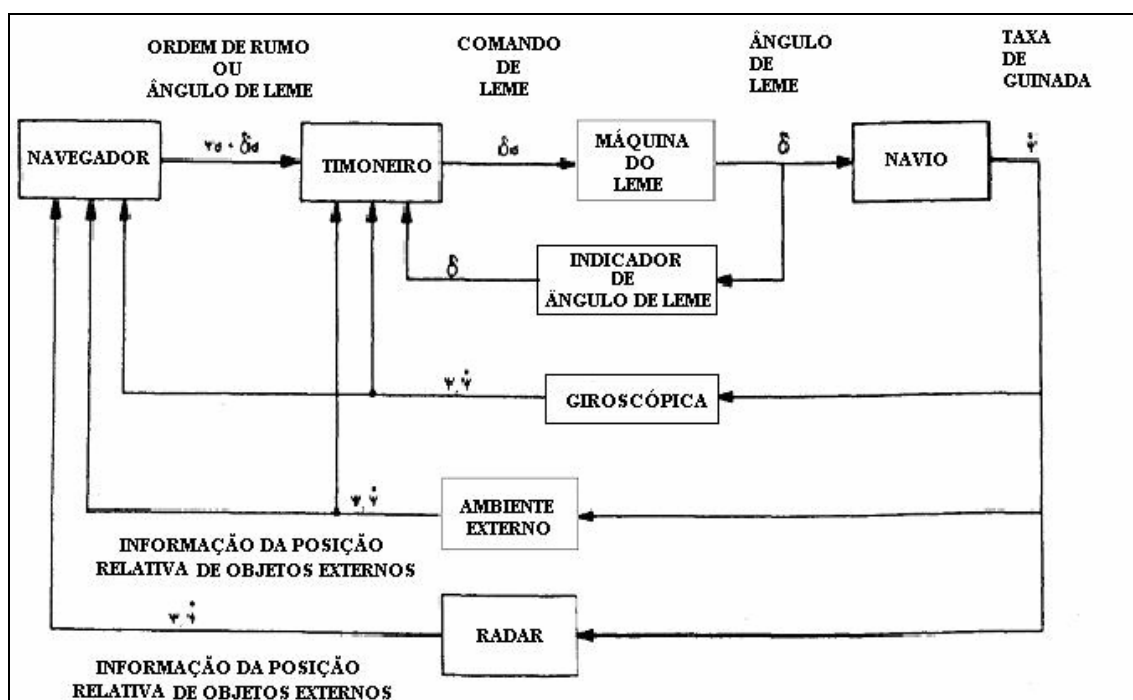


Figura 144 – Malha de Manobra, adaptada de Clarke, Gedling e Hine (1982)

O critério aqui proposto pretende extrapolar os critérios conhecidos para o caso do híbrido, de forma a garantir a segurança de forma racional. A Figura 145 procura elucidar a questão. Nesse sentido o novo critério, modela o ambiente externo, a partir da capacidade de detecção da embarcação pelas demais no oceano.

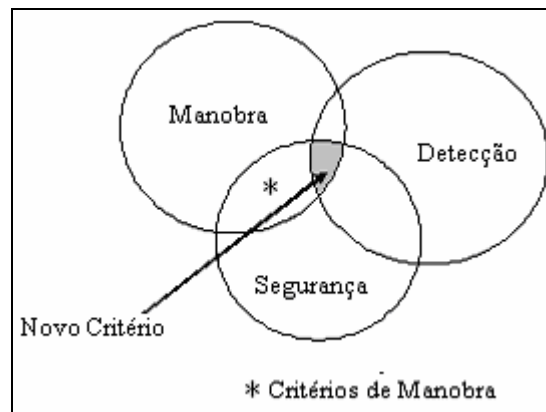


Figura 145 – Interações entre a manobra, segurança e a detecção

A detecção se faz através do radar e da visão, donde é proporcional à seção reta radar (medida indireta). A Seção reta radar, que é a praticamente a mesma seção reta visual e por sua vez, relaciona-se diretamente com a área lateral exposta ao vento (A_L):

$$A_L = \text{comprimento} \times (\text{borda livre} + \text{altura da superestrutura}) \quad (425)$$

A experiência tem demonstrado que, de fato, o navio menor acaba sendo detectado mais tarde, o que acentua o risco de abalroamento. Navios maiores são mais visíveis, entretanto reagem mais lentamente aos comandos de manobra, em razão de sua inércia, e deixam aos pilotos um menor tempo para tomar suas decisões. Percebe-se que esses fatores caminham em direções opostas com o crescimento das dimensões.

Pensa-se que no futuro dever-se-á observar os critérios nessas bases. Por ora, o interesse é o Navio Patrulha de Formas Não Convencionais com Características Submersíveis.

Para esse navio, o critério de manobra tem de atender a três ambientes diferentes:

- (i) plano vertical submerso;
- (ii) plano horizontal submerso; e
- (iii) plano horizontal na superfície.

Propõe-se que se adotem, para a *superfície*, os mesmos índices da norma A751, ponderados pela exposto em Rawson e Tupper (1978), o que parece adequar-se bem, pois o híbrido é mais baixo que um navio de seu porte, sendo, entretanto, mais manobrável, o que compensaria o critério, pelo menos qualitativamente.

Para as demais condições, estima-se que o melhor critério seja a justaposição dos critérios de superfície e submersos, com o aproveitamento dos índices no que couberem.

6.20.1 CONDIÇÕES DE TESTE

As condições de teste são (Resolução A751):

- (i) águas profundas e irrestritas;
- (ii) calmaria (ventos <10 nós);
- (iii) carregamento submerso, ou máximo carregamento, na superfície;
- (iv) rumo base estável na velocidade de teste.

6.20.2 MODELOS DE TESTE

A Resolução A 751 da IMO prevê a possibilidade de se substituir os testes por simulações em computador, em caráter preliminar.

Assim, abrem-se de fato duas possibilidades: executar os testes em provas com o navio real ou em tanques de provas; alternativamente, simular via modelos analíticos ou analítico-empíricos.

Em fases preliminares do projeto, em que muito ainda pode mudar, tanto nas formas quanto nos carregamentos, os modelos analítico-empíricos são amplamente utilizados tanto para navios quanto para submarinos.

6.21 TESTES

Cada teste corresponde de fato a uma manobra, enquanto que cada índice a uma medida particular, seja simulada ou em prova de mar.

Os testes são a forma de averiguação das qualidades manobreadas. Três são possibilidades desses testes:

- (i) executar os testes em provas com o navio real (recomendado);
- (ii) tanques de provas com modelos;
- (iii) simular via modelos analíticos ou analítico-empíricos (previsto na Resolução A 751 da IMO) .

Opta-se por simulação nesse estudo. É um meio barato e rápido..

Tabela 109 – Composição de critérios.

Manobra	Medida	P.Hor.(IMO)	Comentários
Curva de Giro	Avanço	<4.5L	
	Diâmetro Tático	<5L , leme 35° / 3.25 L*, leme 35°	IMO/ Rawson e Tupper, 1978.
	Variação de rumo	<10°/10° de leme para 2.5L	~
Zig-zag	1° overshoot (10°)	10° se $L/V < 10s$, 20° se $L/V \geq 30s$, ($5+0.5L/V$)° se $10^\circ < L/V \leq 30s$.	~
	2° overshoot (10°)	Não exceder o critério acima em 15%	~
	1° overshoot (20°)	Não exceder 25°	~
Parada Brusca	Distância até $V=0$	<15L	~

*para navios de guerra pequenos a alta velocidade

6.22 RESULTADOS NESSA FASE DE PROJETO

Apresenta-se o resultado da estabilidade para a versão V2A, nos planos vertical e horizontal submerso e na superfície.

A teoria linear não apresenta meios de avaliar de forma satisfatória o diâmetro tático, a distância de parada e o zig-zag. Mesmo assim, apresentam-se os valores obtidos por aproximações lineares para essas grandezas.

A Tabela 110 apresenta os resultados da estabilidade no plano horizontal da versão V2A.

Tabela 110 – Resultados para estabilidade do navio, plano horizontal

	Superfície	Submerso
Δ	260	506
L_{pp}	36.9	36.9
B	6.9	6.9
D	2.06	3.6
m'	0.18087	0.20141945
Y_v	-0.1754	-0.1532488
Y_r	0.06254	0.07662439
N_v	-0.0877	-0.0766244
N_r	-0.0438	-0.0383122
C'	-0.0027	-0.003691

Como se pode ver é necessária a adição de uma rabeta, de modo a garantir a estabilidade direcional. Assim fazendo uso das formulações dos itens 6.5 e 6.18, tem-se:

Tabela 111 – Derivadas com a introdução da rabeta

	Superfície	Submerso
A_{rabeta}/LT	1%	1.2%
AR	0.8	0.8
$Y_{v\beta}$	-0.0251	-0.0302
m'	0.18087	0.20142
Y_v	-0.2005	-0.1834
Y_r	0.0751	0.0917
N_v	-0.0751	-0.0615
N_r	-0.0438	-0.0383
C'	0.00085	0.00027

onde A_{rabeta} é a área da rabeta e AR a razão de aspecto da rabeta.

Assim se deve acrescentar ao casco uma rabeta superior e outra inferior, pois essa disposição reduz a resistência ao avanço. A área total dessa rabeta deve ser de 1.2%LD.

Os resultados para estabilidade em altas velocidades, no plano vertical, são expressos na Tabela 112:

Tabela 112 – Resultados da manobra no plano vertical

	Vert
Δ	506
L_{pp}	36.9
B	6.9
D	3.6
m'	0.10509
Z_w'	-0.2937
Z_q'	0.14686
M_w'	-0.1469
M_q'	-0.0734
C_v'	0.0277

Donde se conclui o navio ser estável nesse plano em qualquer velocidade.

Além disso deve-se compensar o efeito da vela. Considerada como um fólio, ela exige uma área que compense o momento que ela gera no plano horizontal submerso. Esse valor foi calculado exigindo que a rabeta aumente em 3 m².

Dessa forma tem-se o novo perfil da embarcação:

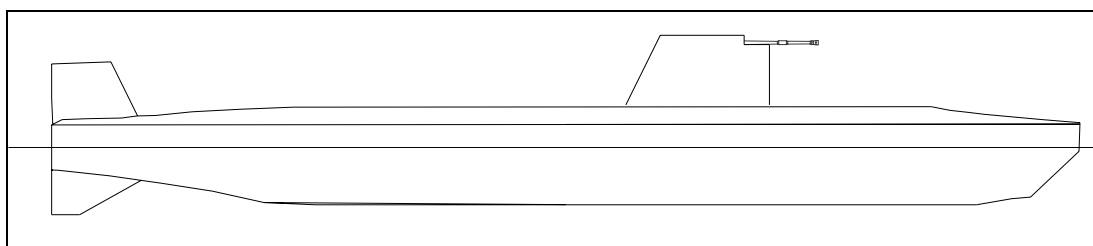


Figura 146 – Novo perfil do navio com estabilizadores

A fim de convalidar esses resultados, a Tabela 113 apresenta uma comparação entre as derivadas da versão V2A e do Flutuador 107-K cujas formas estão apresentadas na Figura 147. O motivo dessa comparação é que esse flutuador tem perfil semelhante ao da versão V2A, sendo mais estreito, porém, no sentido da boca.

Ao se comparar as derivadas de ambos, percebe-se que estão bem próximas, o que era de se esperar.

Tabela 113 – Comparação entre as derivadas da versão V2A e do Flutuador 107-K

	Y_v	Z_w'
107-K	-0.163	-0.2131
V2A	-0.1532	-0.2937
desvio	-6%	38%

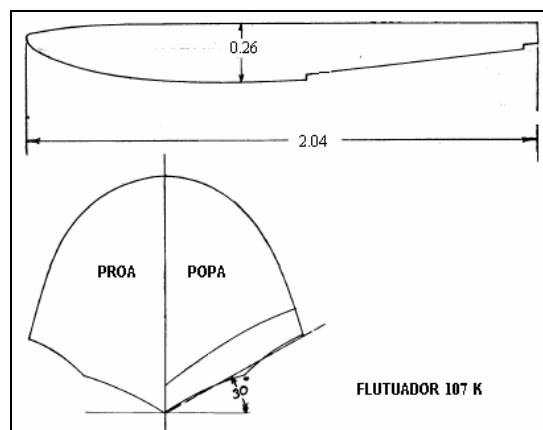


Figura 147 –Linhas do Flutuador 107 K (dimensões em m)



Figura 148 –Linhas do Flutuador 107 K sombreadas pelo perfil da versão V2A

Como explicado a distância de parada, o diâmetro táctico e o afastamento apresentam-se apenas para o plano horizontal na superfície onde têm relevância, de acordo com as hipóteses e formulações apresentadas nos itens 6.6 e 6.7. Assim tem-se:

Tabela 114 – Raio de Giro, distância de parada, avanço e afastamento

	Dados	Crítério
U (nós)	22	
Sm (m²)	267	
dCd/du	0.1257	
Cd0	0.00469	
	Resultados	
SD/L	57.0	Não atende
R_{giro}/L	0.26801	Atende
Avanço/L	1.37551	Atende
Afastamento/L	0.24892	Atende

O diâmetro táctico, o afastamento e o avanço são calculados para 10° e são muito pequenos. Entende-se que seu pequeno valor são limitações apresentadas pela teoria linear.

A distância de parada foi calculada utilizando-se também de teoria simplificada, sob hipóteses diferentes e numa manobra atípica, sem os motores.

O valor de dC_t/du foi estimado com base na curva de resistência a partir de uma reta de quadrados mínimos. Como se pode verificar a hipótese de variação proporcional com a velocidade parece razoável até a velocidade de 5 nós. C_{t0} (a

constante da reta), por outro lado, foi superestimado. Procura-se, assim, representar as velocidades mais baixas, em que C_t se comporta de forma não-linear.

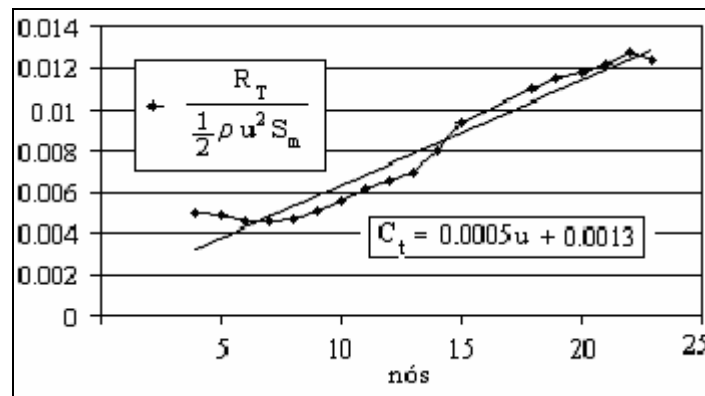


Figura 149 – dC_t/du

6.23 COMENTÁRIOS FINAIS SOBRE A MANOBRABILIDADE

A aplicação do desacoplamento permitiu solucionar o problema de manobra de forma homogênea no plano horizontal, nas condições de superfície e submersa.

O cálculo das derivadas hidrodinâmicas parece ter atingido grau de precisão razoável, principalmente no que se refere a Y_v' . Essa derivada, dependente apenas da geometria, tem pequena variação em relação à derivada experimental Y_v' , do flutuador 107-K, que aparece superposto à versão V2A na Figura 148.

A recomendação de Bohlmann (1989) de acréscimo de espessura à derivada Z_w' foi descartada para a versão V2A. A aplicação da função de espessura de Hoerner (1975), proposta por Bohlmann (1989), conduz a variações imperceptíveis na faixa de valores da versão V2A. A aplicação da função de espessura de Balau (1976) afasta os resultados, pelo menos com respeito aos valores experimentais comparados.

A utilização do VLM para o cálculo da derivada Y_v' e, por analogia Z_w' , foi descartada, porque essa ferramenta não se mostrou eficiente no cálculo de asas de pequena razão de aspecto, ou seja $AR \leq 0.75$, quando em comparação com os valores experimentais da série de lemes de Balau (1976).

A pouca eficiência do VLM para as asas de pequena razão de aspecto ocorre em virtude do efeito de tridimensionalidade, que não é bem captado pela teoria. Pode-se, entretanto, pelo menos, obter resultados qualitativos quanto à contribuição de cada parte (vórtice ferradura) da asa na sustentação total.

O cálculo de sustentação para cada pequena parcela em que é formada a asa permite calcular o efeito de regiões da asa e, com isso, determinar como é composto o coeficiente de sustentação de uma asa assimétrica, que é a idealização do casco de um submarino submerso.

Ao comparar esses efeitos, notou-se que o casco se comporta como uma asa simétrica de razão de aspecto igual a envergadura total e não como a composição de duas asas diferentes com razões de aspecto menores.

Isso permitiu a substituição no plano horizontal submerso da razão $2T/L$, por D/L , encontrando erros na faixa de 22%, em relação aos valores experimentais do casco do flutuador 107-K.

Pode-se dizer que a teoria de asas de pequena razão de aspecto e as demais previsões teóricas testadas não podem prever a sustentação de um dirigível do tipo

Zeppelin e, por isso, o veículo R-38(ZR-2) foi retirado da composição dos desvios médios da análise.

A formulação apresentada por Jorgensen (apud TRIANTAFYLLOU e HOVER, 2004) não se mostrou razoável para prever a sustentação de corpos axissimétricos como os apresentados na Figura 143, então não participou da análise das derivadas, como melhor explicado no item 6.17.

A escolha do método mais adequado para o cálculo das derivadas hidrodinâmicas se deu na observância de três critérios: generalidade, menor desvio com respeito aos dados experimentais e simplicidade. O menor desvio com relação aos experimentos foi considerado apenas secundariamente, porque o número de comparações é insuficiente para garantir que seja esse o critério mais importante. O critério de simplicidade, apenas no caso de empate.

Escolheu-se para o cálculo de derivadas hidrodinâmicas a idealização do navio como uma asa de pequena razão de aspecto (NORRBIN, 1971) que concorda com os valores obtidos pela teoria de corpos esbeltos (NEWMAN, 1977) quando aplicada a uma placa plana para todas as derivadas de velocidade.

Para a derivada Y_r' , no plano horizontal na superfície, preferiu-se, no entanto, a formulação de Clarke, Gedling e Hine (1982) que apresenta os menores valores com os resultados experimentais.

A estabilidade no plano horizontal foi garantida com a introdução de rabetas, o que, no entanto, não altera a resistência da versão V2A, consumindo parcela da margem de segurança que se adotara para o cálculo da área molhada.

Recomenda-se que no futuro se estude o efeito de instabilização causado pela vela, que deverá aumentar a área da rabeta. Preliminarmente, entende-se o braço da vela é muito pequeno, o que implica um acréscimo na rabeta que não afeta a resistência ao avanço, pois esse acréscimo tem $\frac{1}{4}$ da área total da vela.

A versão V2A é muito estável no plano vertical, recomenda-se que um leme retrátil deve ser acrescentado à proa, com estudo e detalhamento posterior, que verifique inclusive as derivadas de velocidade e permita uma simulação dinâmica.

O raio de giro calculado pela teoria linear não se apresenta razoável, o mesmo se podendo dizer das demais características hidrodinâmicas.

O critério de manobra propõe e instrui um processo racional de extrapolação de resultados a partir de critérios já existentes, tentando incluir a detecção através da seção reta radar da embarcação, proposta que mereceria melhor detalhamento posterior.

7 MEDIDAS DE DESEMPENHO (V2A)

Entende-se que pretender que o híbrido satisfaça às missões hipotéticas que o próprio trabalho lhe propôs, significa provar a premissa através do uso da própria premissa.

Pretender que o híbrido seja bom nas funções de híbrido é interessante, mas não satisfaz a pergunta que se propõe: é válida a concepção da embarcação híbrida, ou não?

Para responder a essa questão, deve-se apresentar um desenvolvimento lógico coerente, a partir de outros fatores, e questionar-se as próprias hipóteses de missão do híbrido.

Observe-se que pertencer à categoria navio ou submarino não atribui eficiência a uma embarcação, *a priori*. Assim, não se pode afirmar que um submarino, cumprindo funções de patrulha, cumpra-as com eficiência menor que um patrulha. Pode haver um patrulha tão ruim que um submarino seja melhor que ele em tudo. O cumprimento da missão depende de fatores particulares de cada embarcação como, por exemplo, o poder de fogo (mísseis, canhões, etc), suas ameaças ou poder de detecção dos equipamentos. Esses fatores não estão disponíveis na literatura, em geral.

Como há pouca informação disponível, não há como dizer se qualquer submarino ou navio seja melhor que outro, ou se a concepção de híbrido é proveitosa ou não. Tantas são as incertezas que essa resposta é em si um problema particular, objeto da ciência da estratégia e tática navais. Pergunta-se, por exemplo, quais as ameaças que enfrentam um patrulha? Essa resposta é particular no tempo e no espaço, ou seja, depende da região, por exemplo, no Oriente Médio não ocorre o mesmo que no Brasil; e do tempo, a cada ano as ameaças crescem tecnologicamente.

Uma série de dados, por outro lado, têm relação direta com as missões que esses navios desempenham e encontram-se disponíveis sobre as embarcações: velocidade, comprimento, etc. Esse relacionamento *dados-da-embarcação/missão* não é explícito, mas pode ser estimado, o que pretende ser atingido nessa tese.

Assim se explora essa dependência intrínseca e pretende utilizar um processo de engenharia reversa para se permitir que o conhecimento oculto (ameaças, funções, profundidades de operação, etc) possa ser substituído por um conjunto coerente de informações, verificando a validade das missões e quais as características que esse híbrido deveria ter. A Figura 150 elucida o raciocínio por detrás do exposto:

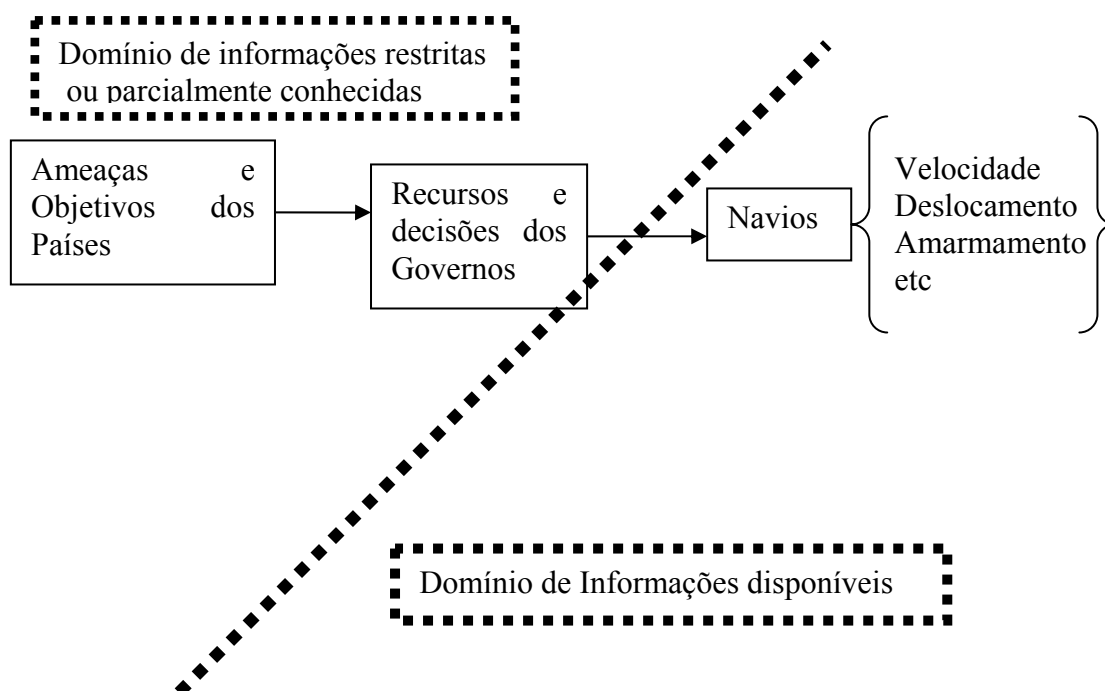


Figura 150 –Domínios de informação

Em virtude de seu emprego, que é um fator de segurança de cada país (portanto sigiloso), uma embarcação acaba atingindo alguns requisitos do armador (no caso militar, do governo): Velocidade, etc. O estudo desses requisitos (fatores de projeto como velocidade e raio de ação, disponíveis em Sharpe, 1996, por exemplo) permite ter-se uma indicação de quais são essas informações “secretas” e, ainda, valorar as embarcações porque, em média, as funcionalidades são correlatas em todos os países, como se pode evidenciar na Tabela 8.

Pode-se afirmar que todos os navios com certa funcionalidade (classe) têm determinadas características necessárias. Assim, um determinado navio que não apresente valores na faixa média será melhor se acima e pior se abaixo da faixa. O raciocínio é válido quando se tratar de uma variável que se tenha interesse em ver crescer, como, por exemplo, a velocidade. Aplica-se o inverso quanto ao custo.

Como existe um forte relacionamento entre as características finais de uma embarcação e seu emprego tático-estratégico, parece possível partir das características de modo a prescindir dos requisitos, partir-se das características de navios “semelhantes” e avaliar um novo navio. Informalmente, é essencialmente o processo mental realizado pelas pessoas envolvidas com a arte da guerra, sejam militares, ou estrategistas civis.

O método escolhido, a análise envoltória de dados, abreviadamente, DEA - *Data Envelopment Analysis*- infere um rendimento que parte das características conhecidas e se relaciona indiretamente com a missão ou tarefas da embarcação. Trata-se de um método amplamente utilizado em economia que dá notas relativas com o uso de um algoritmo de programação linear.

No caso em estudo, abstraem-se as tarefas e avaliam-se o desempenho das embarcações com relação às características desejáveis de cada uma. Propõe-se que esse método seja geral e, no futuro, constitua um meio de avaliar os navios e paralelamente orientar direções para o projeto.

As alternativas ao emprego do DEA como método de avaliação são fortemente dependentes de aspectos subjetivos e de muitos fatores não disponíveis, como ameaças ou características geométricas das embarcações (C_p , C_b), raramente conhecidos. Os mais difundidos são a modelagem matemática do problema ou métodos multicritério de apoio à decisão. Exemplo clássico da modelagem matemática é método MEA (military and economic analysis), citado em Kormilitsin e Khalizev (2001), aplicado na Europa Oriental, notadamente Rússia. Já a aplicação de métodos multicritério tem no AHP - *Analytical Hierarchical Process*- seu maior representante (mormente empregado nos EUA).

O MEA, análise militar e econômica, divide-se em duas partes:

- (i) Formulação de um modelo descritivo do navio e de seu emprego;
- (ii) Modelo formal, matemático, que o exprime em expressões analíticas.

Na primeira fase, são dados de entrada a área de combate, as características das forças hostis, o modo de combate etc. Na segunda fase, elaboram-se soluções de projeto, ou seja, navios possíveis, TSP -*Technical Solution Parameters*- e os parâmetros técnicos de tais soluções, ou seja, níveis de assinatura, número de armas e suas características, deslocamento, máxima profundidade de operação (submarinos) etc.

A maior parte da modelagem russa tem base em modelos matemáticos complicados que envolvem estatísticas de capacidades de interceptação, tamanho da força, capacidade de acerto do armamento etc.

Apesar de formalmente eficiente, o modelo russo apresenta uma dependência de parâmetros que além de variáveis no tempo são também variáveis no espaço. Cada

vez que se quiser utilizar esse modelo, dever-se-á calibrá-lo em função das condições particulares de cada país.

O modelo AHP exige a interferência de especialistas. Exemplificado em Brown e Salcedo (2002) esse método exige conhecimentos específicos com o ambiente ASW, o coeficiente prismático, o coeficiente de seção mestra, as contra-medidas de minagem, informações que não estão expostas na literatura.

A ferramenta DEA ao contrário, de simples aplicação, permite obter diretamente os valores que otimizam a eficiência de uma embarcação, entendida enquanto plataforma que carrega armamento, ou cargas, no caso de navios mercantes.

A generalização do método DEA para navios mercantes é muito interessante, abrindo um novo campo de pesquisas: comparar navios a partir de seus “fatores de projeto”, ou seja, suas características operativas.

Como a resposta ao método é em forma de características funcionais, como, por exemplo, velocidade, permite-se orientar o projeto no caminho que maximize sua eficiência como Brown e Salcedo (2002) fizeram utilizando-se do método AHP. Isso corresponde a uma grande aplicação ao projeto do navio e a um outro vasto campo de estudos.

7.1 MEDIDAS DA EFICIÊNCIA DO PROJETO

A técnica usual para a investigação por embarcações semelhantes são regressões, com uma ou múltiplas variáveis. Este tipo de análise não permite, porém, que se saia da norma das características destas embarcações, como, por exemplo criar novos atributos para missões ou funções inéditas, que poderão gerar, em consequência, novas características. Além disso, não permite a valoração dessas embarcações, porque todos os elementos fora da média (*outliers*) não têm como ser entendidos pelo método, sendo muitas vezes desprezados, considerados não semelhantes à embarcação em estudo.

A DEA, ao contrário, permite medir os desempenhos dos elementos do conjunto de dados determinando uma fronteira de máxima eficiência com pontuações (até 100) para embarcações de diferentes tipos e missões. Além disso, a aplicação da DEA permite realizar comparações com pouca interferência dos avaliadores, o que diminui a subjetividade do processo.

Para o caso da concepção híbrida proposta, que objetiva ter missões mais diversificadas, nunca antes combinadas em uma mesma nave, resolveu-se proceder de forma a comparar navios patrulha em conjunto com submarinos através das características físicas julgadas relevantes e comuns para seus desempenhos:

Tabela 115- Inputs e outputs

<i>Inputs</i>	<i>Outputs</i>
Deslocamento na Superfície - Δs	Velocidade na Superfície – Vsp
Potência – Pot	Raio de Ação – RA
Comprimento – L	Autonomia – Auto
Diâmetro do casco resistente - CR	Velocidade Submersa – Vsb

Deve-se ter em conta que alguns dados são difíceis de conseguir de semelhantes: por exemplo, o verdadeiro diâmetro do casco resistente não é de fato conhecido, a não ser no caso do híbrido. Entretanto, como a maioria dos submarinos atuais é de casco simples (SILVA et al., 1996a) a estimativa é de que seja aproximadamente igual à boca.

A discriminação dos parâmetros ou fatores de projeto entre insumos e produtos (*Inputs* e *Outputs*), além de considerar aqueles fatores que são de desempenho, se baseou em hipóteses acerca da composição do custo:

- (i) o custo de produção, para navios de superfície é variável dependente do comprimento;

- (ii) o custo de produção para submarinos é variável dependente do diâmetro do casco resistente;
- (iii) o custo de operação dos navios e submarinos é variável dependente do deslocamento na superfície, pois esse é praticamente igual ao peso leve, que é a medida física que indica a massa excluindo os consumíveis, óleo, munição e água;
- (iv) o custo de operação dos navios depende da eficiência propulsiva: para a mesma quantidade de combustível, pode-se atingir maiores velocidades. Com isto, o raio de ação e a velocidade na superfície são boas formas de avaliação (como Outputs), tendo-se a potência instalada como Inputs;
- (v) para um mesmo submarino a capacidade de se ocultar depende de sua velocidade, sendo, portanto, uma medida de eficiência de um submarino a sua velocidade submersa;
- (vi) os navios patrulha não têm nem velocidade submersa nem casco resistente, e, portanto, não pontuariam nestas colunas. Por outro lado, os submarinos são muito superiores aos patrulhas em ocultação, e a velocidade submersa nula é uma medida indireta dessa capacidade.

Após análises comparativas mais detalhadas de algumas destas embarcações, notou-se que há nestas pontuações, compensações que as tornam uma medida razoável, sendo então incorporadas à análise. Isso se revelou coerente, pois há patrulhas cuja pontuação fica nesta fronteira do conjunto de dados.

Deve-se notar que a autonomia é medida em dias e pode ser gasta com velocidade nula. O raio de ação é medido em milhas náuticas e na velocidade econômica do navio, ou seja, a de menor consumo de combustível. Isso faz com que o raio de ação seja completado em um tempo sempre menor ou igual à autonomia. Em geral, o raio de ação é completado no tempo igual ao da autonomia, sendo que para o híbrido a autonomia é bem maior, pois ele passa boa parte do tempo submerso com velocidade zero.

7.2 A ANÁLISE DE ENVOLTÓRIA DE DADOS

Uma simples medida de eficiência para navios poderia ser formulada através de um Indicador de Eficiência (η), como:

$$\eta = \sum \pi_j n_j / \sum \pi_j \quad (426)$$

onde n_j é a nota para o valor de cada parâmetro de interesse, π_j são os pesos associados a cada parâmetro j , onde j varia até o número de parâmetros

Tomando-se essa nota como o próprio valor do parâmetro, adimensionalizado pela média, o que a torna menos subjetiva, x_j , tem-se:

$$\eta = \sum \pi_j x_j / \sum \pi_j \quad (427)$$

Neste caso, grau de subjetividade passa a estar inserido apenas no peso. Entretanto, formular desta maneira ainda é insuficiente porque não permite medir importantes relações de custo benefício entre parâmetros de projeto, como por exemplo, a relação entre potência instalada e uma dada velocidade máxima. Dessa forma, é necessário evoluir para uma medida de uma eficiência (η) que relacione medidas de desempenho (y – produto ou *output*) com variáveis de projeto (x – insumo ou *input*), como $\eta = y / x$.

Generalizando esse conceito para n fatores de projeto tem-se:

$$\eta = y / \sum v_j x_j \quad (428)$$

onde v_j é o peso de cada fator de projeto ou input j , $j = 1, \dots, n$.

Na hipótese de m resultados desejados, com peso u_j , $j = 1, \dots, m$, a formulação ficaria:

$$\eta = \sum u_j y_j / \sum v_j x_j \quad (429)$$

Essa formulação permite estender as notas para qualquer submarino, patrulha ou híbrido, existente ou por construir, por inclui o valor de cada parâmetro observado, adequado a cada concepção, independente do tipo. Desta forma, nem todo submarino ou patrulha obterá nota ou eficiência máxima, e todos estarão julgados por seus atributos intrínsecos e coerentes.

Esse conjunto de escolhas permite que cada embarcação seja representada, neste trabalho, por uma n -upla ordenada de valores de seus parâmetros ou fatores de projeto.

Até este ponto, entretanto, ainda há o problema da subjetividade dos pesos atribuídos a resolver.

Segundo Lins e Meza (2000), em economia, educação, eleições e em mais de 1300 referências só da Universidade de Warwick tem-se firmado o método mencionado, DEA (data envelopment analysis).

Esse método exclui a intervenção dos avaliadores. Nele, a influência humana limita-se à análise dos resultados, à escolha dos parâmetros de interesse (velocidade, deslocamento, etc) e da formulação a ser empregada. O modelo DEA, Voltado a Multiplicadores (LINS e MEZA, 2000), tem a forma:

$$\max \eta_k = \sum_{j=1}^n u_j y_{kj} / \sum_{j=1}^m v_j x_{kj} \quad (430)$$

tal que

$$\sum_{j=1}^n u_j y_{ij} / \sum_{j=1}^m v_j x_{ij} \leq 1 \quad (431)$$

$$u_j, v_j \geq 0, \quad \forall j \quad (432)$$

onde η_k é a eficiência da DMU em avaliação k, x_{ij} é a quantidade do input j para a DMU i, analogamente, y_{ij} é a quantidade do output j para a DMU i, v_j é o peso do input j e u_j do output j, m é o total de inputs, n o total de outputs.

Essas equações de 430 a 432 podem ser linearizadas como (apud LINS e MEZA, 2000):

$$\min \eta_k = \sum_{j=1}^n u_j y_{kj} \quad (433)$$

tal que

$$\sum_{j=1}^m v_j x_{kj} = 1 \quad (434)$$

$$\sum_{j=1}^n u_j y_{ij} - \sum_{j=1}^m v_j x_{ij} \leq 1 \quad (435)$$

$$u_j, v_j \geq 0, \quad \forall j \quad (436)$$

A natureza do programa de programação linear permite transformar a busca pelos pesos u_j e v_j na busca pelos coeficientes de eficiência η associados a cada DMU, esses modelos são conhecidos como modelos duais e são os comumente adotados computacionalmente por reduzirem o número de variáveis e equações. A seguir o modelo dual para do equacionamento anterior:

$$\min \eta_k \quad (437)$$

tal que

$$\eta_k x_{kj} \geq \sum_{i=1}^I \lambda_i x_{ij} \quad (438)$$

$$y_{kj} \leq \sum_{i=1}^I \lambda_i y_{ij} \quad (439)$$

$$\lambda_j \geq 0, \quad \forall j \quad (440)$$

O programa de programação linear elimina a intervenção humana, pois os pesos atribuídos são os que satisfazem ao critério de maximização da eficiência da embarcação avaliada (genericamente, DMU, *decision making unit*). Enfatiza-se que a nota recebida por cada DMU (η_k) resulta da aplicação do problema de programação linear.

O modelo das equações 437 a 440 é conhecido como de retorno de escalas constantes, CRS (*Constant Returns to Scale*), orientado a *inputs* (insumos), ou seja, minimiza as entradas e mantém inalteradas as saídas¹⁴.

O modelo CRS considera que novas variações em insumos relacionam-se às novas variações de produtos (*outputs*) de forma linear.

Nesse trabalho, o modelo proposto para a avaliação de navios é ligeiramente diferente, conhecido por retorno variável de escalas, abreviadamente VRS (*Variable Returns to Scale*). Ao contrário do modelo CRS, o modelo VRS considera que novas variações em insumos relacionam-se às variações em produtos de forma decrescente. A seguir é representado o modelo VRS orientado à *inputs*:

$$\begin{array}{ll} \min \eta_k & (441) \\ \text{tal que} & \end{array}$$

$$\eta_k x_{kj} \geq \sum_{i=1}^I \lambda_i x_{ij} \quad (442)$$

$$y_{kj} \leq \sum_{i=1}^I \lambda_i y_{ij} \quad (443)$$

$$\lambda_j \geq 0, \quad \forall j \quad (444)$$

$$\sum \lambda_j = 1 \quad (445)$$

A diferença entre ambos é que o modelo CRS exige que um aumento nos insumos (*inputs*) seja correspondente a um aumento proporcional nos produtos (*outputs*) (PODINOVSKI, 2003), ou seja, uma proporcionalidade rígida entre input e output, o que não se aplica a projetos navais. Por este motivo optou-se pelo método VRS.

Com as formulações apresentadas, os métodos VRS e CRS são programados em *software* comercial, que geram gráficos quando em até duas dimensões. Nesses gráficos, cada DMU corresponde a um ponto. As eficiências de cada DMU podem ser entendidas como distâncias em relação à curva convexa¹⁵, envoltória desses pontos nos

¹⁴ O modelo orientado a *outputs* maximiza as saídas e mantém inalteradas as entradas (GOMES, MELLO e BIONDI NETO, 2003)

¹⁵ medidas no eixo da abscissa para o modelo orientado a *inputs* e no eixo das ordenadas para o modelo orientado a *outputs*

gráficos, que é linear por partes. Quanto mais próximo à fronteira, maior grau de eficiência é atribuído ao ponto (LINS e MEZA, 2000).

Quando o número de dimensões (*inputs* e *outputs*) cresce, o problema fica n-dimensional e perde-se a possibilidade de visualização.

A metodologia permite, portanto, obter-se notas para cada uma das embarcações com dados disponíveis na literatura. Para este fim, utilizou-se predominantemente a publicação *Jane's Fighting Ships* (SHARPE, 1996) para a aquisição de dados.

Uma vez que se atribui uma nota para a embarcação como um todo, o que de fato se faz, é obter uma medida de eficiência total, conhecida na literatura americana como OMOE (*overall measure of effectiveness*), sem, contudo, passar pelo crivo dos requisitos de projeto.

A aplicação do método permite que se adote um processo interativo na definição de valores dos fatores de interesse, pois, na medida em que pontua os navios por seus parâmetros característicos, permite visualizar quais características que esses navios devem ter, para que se maximize sua eficiência. Isso é útil para decisões que envolvem a inter-relação entre fatores de natureza diferente, como por exemplo, a decisão relativa entre o aumento da velocidade em um nó ou a redução do comprimento da praça de máquinas.

7.3 RESULTADOS DAS MEDIDAS

Para as medidas utilizou-se o programa Frontier Analyst , da Banxia Software Ltd., que possibilita o cálculo automatizado do método VRS.

Foram testadas 29 alternativas de híbridos, Tabela 119, em comparação com navios-patrolha, Tabela 117, submarinos, Tabela 116 e algumas corvetas, Tabela 118. Os valores de autonomia para os navios patrulha, quando não fornecidos, foram estimados com base na razão raio de ação / velocidade no raio de ação. Procurou-se inserir projetos muito recentes, como o Projeto 10411, russo, mas também foram incluídos alguns navios antigos como o patrulha fluvial Roraima, projeto da década de 50 e projetos de antigos submarinos, como os CA11 e CA12.

Para os híbridos, optou-se por inserir os valores mínimos aceitáveis para fatores de projeto que possibilitassem analisar-se sua influência na eficiência. Por exemplo, o mínimo raio de ação submersa em 100 milhas.

Apesar de apresentados de forma dividida, os navios e submarinos foram avaliados num só bloco, com o método DEA/VRS. Caso contrário, a pontuação seria relativa a cada grupo e não ao total das embarcações.

Utilizou-se o próprio método para analisar-se a sensibilidade do resultado em função de alguns fatores de projeto, i.e., quais têm peso maior na eficiência, com o objetivo de indicar tendências. Dessa forma, foram variados sistematicamente os fatores de projeto: deslocamento, comprimento, velocidades na superfície e submerso, casco resistente, potência, raio de ação e autonomia, Tabela 119 . As embarcações (DMUs) marcadas em cinza claro são variações paramétricas apenas, a despeito de sua exeqüibilidade.

Para permitir distinguir as embarcações híbridas criou-se um código alfanumérico DxxxLxxVxxC, onde Dxxx representa o deslocamento e seu valor, Lxx o comprimento da embarcação, Vxx a velocidade, C o diâmetro do casco resistente padrão de 3.12 m, C+ o diâmetro ligeiramente acima desse valor (3.5m), Cx o valor de diâmetros diferentes, C- valores ligeiramente abaixo do padrão (3.1m). Por fim, quando C não aparece significa que a embarcação híbrida não tem casco resistente, mas pode submergir até uma pequena profundidade.

O híbrido final, versão 30 (D252L37V22C) pontuada, contém as características de projeto da própria embarcação, necessária para verificar a viabilidade da concepção. Pode-se passar uma reta n-dimensional dos méritos (coluna VRS) para os pontos

representativos das embarcações avaliadas. Interessante notar, que o ingresso de híbridos não modifica sensivelmente a pontuação alcançada pelos demais navios e submarinos:

$$\eta = -1.21\Delta s - 2.18L + 3.58e-4D + 0.23BkW + 0.24V_{sup} + 0.006RA + 3.71a_{ut} + \\ +12.19V_{sub} + 72.86 \quad (446)$$

onde η n-dimensional que relaciona o mérito das embarcações, obtida a partir do emprego do método DEA/VRSR²=0.98

Tabela 116 – Submarinos

DMU	Δs (t)	L (m)	CR (m)	BkW (kW)	Vsup (kt)	RA (mn)	Auto (d)	Vsub (kt)	VRS
Santa Cruz (TR1700)	2116	66	7.3	6600	15	12000	62.5	25	100
Salta (IKL209/1200)	1248	55.9	6.3	3360	10	6000	31.2	22	100
Collins	3051	77.5	7.8	5400	10	11500	47.9	20	76
SNAC-I (projeto)	1850	67	8	3380	11	11000	57.2	25	100
Thomsom(IKL209/1300)	1260	59.5	6.2	3380	11	400	4.17	21.5	98
Kilo (877EKM/636)	2325	73.8	9.9	4340	10	400	5.5	17	60
Agosta	1510	67.6	6.8	3400	12	8500	39.3	20	88
Type212	1350	53.2	6.8	2850	12	8000	41.6	20	100
Shishumar (IKL209/1500)	1660	64.4	6.5	3380	11	13000	54.1	22	100
Kilo(877EM)	2325	72.6	9.9	4340	10	400	5.56	17	61
Kilo(877EKM)	2356	73.8	9.9	4050	10	400	5.56	17	61
Improved Sauro	1653	64.4	6.8	2500	11	11000	41.6	19	98
Sauro (type1081)	1456	63.9	6.8	2360	11	11000	41.6	19	100
ChangBogo(IKL209/1200)	1100	56	6.2	3380	11	7500	39.0	22	100
Galerna (Agosta class)	1490	67.6	6.8	3400	12	350	4.17	20	87
Hai Lung	2376	66.9	8.4	3740	12	10000	46.3	20	84
Preveze (IKL209/1400)	1454	62	6.2	3380	15	8200	42.7	21.5	100
Cabalo (IKL209/1400)	1285	61.2	6.2	3380	10	7500	31.2	22	100
CA-2	12	10	1.9	21	7	20	0.42	2	100
CA-3	12.8	10.4	1.9	21	7	70	1.46	2	100
A-1	165	30.48	3.5	450	11.5	500	0.25	5	100
A-5	180	30.2	3.89	550	12	500	0.25	5	94
A-13	180	30.2	3.89	400	11	500	0.25	5	100
Type IIA	254	40.3	4.08	700	13	1680	5.83	4	77
Gur	755	72.4	6.2	2880	20	1880	1.05	4	28
Vetehinen	493	63.5	6.2	1160	12.6	1500	0.78	4	39
Sauko	99	32.4	4.1	200	9	375	0.47	4	100
Vesiko	250	40.9	4.1	700	10.5	1500	0.52	4	71
S1	840	77.8	6.4	4000	19.5	9800	2.06	3	100

Tabela 117 - Relação de Navios e Lanchas Patrulha

DMU	Δs (t)	L (m)	CR (m)	BkW (kW)	Vsup (kt)	RA (mm)	Aut	Vsub (kt)	VRS
Vita	376	56.3	0	17944	35	1800	4.17	0	40
Province	394	56.7	0	11190	38	2000	4.63	0	51
FPB-57	410	58.1	0	11190	36	1300	1.81	0	32
Combat. IIIM	425	56	0	13980	38.5	2000	5.56	0	54
Al Siddiq	478	58.1	0	17158	38	2900	8.63	0	69
Project 12421	550	56.1	0	17904	38	2400	7.69	0	60
Gyrza	32	20.7	0	1492	29	250	5.00	0	100
Cayman-80	83	27.88	0	4400	24	450	7.00	0	74
Universal	330	44	0	13920	42	2500	10.0	0	100
Languard 33	7.5	10.4	0	224	27.5	265	0.46	0	100
Lina –Projeto 10411	386	49.5	0	11850	32	1600	10.0	0	51
Lina –Projeto 10410	375	49.5	0	11850	30	1500	10.0	0	51
Osa II	243	38.6	0	11190	37	1620	5.00	0	58
Tirya	266	41	0	12085	35	1800	8.00	0	55
Tarantul 1	455	56.1	0	32000	43	2000	10.0	0	100
Tarantul 2	500	56.1	0	32000	40	2000	10.0	0	66
Tarantul 3	550	56.1	0	32000	38	2400	10.0	0	60
Nanuchka	675	59.3	0	25800	34	2500	10.0	0	48
PB Mk3	37	21.4	0	484	26	450	5.00	0	100
MK V	68	27.5	0	1704	45	500	0.50	0	100
SOCR	8.5	11	0	328	40	195	0.27	0	100
Pedro Teixeira	690	63.5	0	2864	16	6800	21.7	0	100
Roraima	340	46.3	0	1432	14	6000	22.7	0	100
Piratini	146	28.9	0	820.6	17	1700	5.90	0	67
Grajaú	263	46.5	0	4393	22	2200	18.0	0	80
Bracuí	890	47.6	0	2312	14	4500	18.7	0	83
Parnaíba (Monitor)	720	55	0	1119	12	1350	16.0	0	95
Asheville	245	50.1	0	10817	40	320	0.48	0	25
Combat. II	275	47	0	8952	36	850	1.42	0	32
Dagger	270	50.2	0	17158	41	2000	4.90	0	72
Fremantle	211	48.1	0	4565	31	4800	25.0	0	100
Gerong	244	44.9	0	8392	32	2000	5.95	0	49
Kaman	275	47	0	9160	38	2000	5.56	0	62
Lagaza	275	58.1	0	5595	28	6100	14.9	0	100
Lungching	250	50.2	0	8952	40	2700	9.38	0	100
Lurssen-45	228	44.9	0	9564	40	500	0.55	0	33
Mubarraz	260	44.9	0	6990	40	500	0.55	0	33
OSA-1	210	39	0	8952	35	400	0.49	0	31
P48S	308	52.6	0	4312	25	2000	5.21	0	41
Perdama	265	47	0	10444	37	1800	5.00	0	52
Prabparapak	224	45.4	0	10175	40	2000	5.56	0	75
Ramadan	307	52	0	11458	40	1600	4.17	0	55
Saar-II	250	45	0	8952	40	2500	6.94	0	89
Sattahip	300	50.1	0	5087	22	2500	6.94	0	49
SG-40	210	40.6	0	4998	30	3000	8.33	0	74
Tiger	265	47	0	8952	36	1600	4.44	0	45
Tuima	245	33.6	0	11190	37	500	0.60	0	38

Tabela 118 – Corvetas

DMU	Δs (t)	L (m)	CR (m)	BkW (kW)	Vsup (kt)	RA (mn)	Auto (d)	Vsub (kt)	VRS
PB-102 - 2ª guerra	1539	94.89	0	28500	26	2500	8.68	0	26
Inhaúma	1970	95.8	0	33592	28	4000	45.0	0	100

Tabela 119 - Dimensões de Híbridos

DMU	Δs (t)	L (m)	CR (m)	BkW (kW)	Vsup (kt)	RA (mn)	Auto (d)	Vsub (kt)	VRS
D200L38V20C	200	38	3.12	5200	20	100	5.00	4	65
D220L38V20C	220	38	3.12	5200	20	100	5.00	4	61
D240L38V20C	240	38	3.12	5200	20	100	5.00	4	58
D260L20V20C	260	20	3.12	5200	20	100	5.00	4	84
D260L25V20C	260	25	3.12	5200	20	100	5.00	4	67
D260L30V20C	260	30	3.12	5200	20	100	5.00	4	58
D260L35V20C	260	35	3.12	5200	20	100	5.00	4	55
D260L38V20C	260	38	3.12	5200	20	100	5.00	4	55
D260L38V20C+	260	38	3.5	5200	20	100	5.00	4	54
D260L38V20C4	260	38	4	5200	20	100	5.00	4	54
D260L38V20C5	260	38	5	5200	20	100	5.00	4	54
D260L38V5C	260	38	3.12	2600	5	100	5.00	4	50
D260L38V10C	260	38	3.12	2600	10	100	5.00	4	50
D260L38V15C	260	38	3.12	2600	15	100	5.00	4	52
D260L38V20C	260	38	3.12	2600	20	100	5.00	4	55
D260L38V20C	260	38	3.12	2600	20	120	5.00	4	55
D260L38V20C	260	38	3.12	2600	20	150	5.00	4	55
D260L38V20C	260	38	3.12	2600	20	200	5.00	4	55
D260L38V20C	260	38	3.12	2600	20	300	5.00	4	55
D260L38V20C	260	38	3.12	2600	20	100	10.0	4	72
D260L38V20C	260	38	3.12	2600	20	100	14.0	4	87
D260L38V20C	260	38	3.12	2600	20	100	15.0	4	91
D260L38V20C	260	38	3.12	2600	20	100	5.00	5	65
D260L38V20C	260	38	3.12	2600	20	100	5.00	6	77
D260L38V20C-	260	38	3.1	2600	20	100	5.00	7	91
D260L33V20	260	33	0	2600	15	100	5.00	7	100
D260L38V20C	260	38	3.12	2600	15	100	5.00	7	90
D260L38V20	260	38	0	2600	15	100	5.00	7	100
D260L33V20C	220	33	3.12	2600	20	100	5.00	7	100
D252L37V22C^(final)	252	36.9	3.12	5200	22	200	15.00	7	100

8 VERSÕES V4, V5, V5A E V6

As versões que ora se apresentam são versões adicionais, merecedoras de fazer parte do trabalho em virtude do serem variantes (ou outras formas de interpretação) de uma embarcação que a esse ponto já se prova viável, o Navio Patrulha com Características Submersíveis.

A versão V4 é escolhida para ser a versão de planeio. A versão V5  e V5A  são versões de semiplaneio. A versão V6  é a versão SWATH, todas projetadas para pequenas profundidades (4 m na V6 , 8.5 m nas outras). Arbitra-se que a versão V6  diferentemente das demais, não esnorqueia, por sua grande altura. A Figura 67 ilustra a seção mestra dessas embarcações.

As versões V4 , V5  e V5A  são totalmente em alumínio. A versão V6 é em alumínio (plataforma) e aço (torpedos). Isso se deve a razões de resistência estrutural e peso excessivo dessa última versão.

O projeto da versão V5  dá origem à versão V4  e V5A . A versão V5A  é o aproveitamento da forma hidrodinâmica da versão V2A . Essas embarcações apesar de terem o ônus de submergirem à pequena profundidade, levam a vantagem de carregar mais potência, porque seus arranjos são mais livres com melhor aproveitamento dos espaços e, sobretudo, das alturas disponíveis para arranjo de equipamentos.

O problema de determinação das dimensões principais dessas embarcações segue aos seguintes condicionantes:

- (i) satisfazer ao peso preliminar com as linhas na forma de chapas planas e quinas (apenas nas versões V4  e V5 ). Esse peso é determinado pelos grupos de peso do interior do navio;
- (ii) satisfazer ao volume de tanques necessários à submersão e flutuabilidade;
- (iii) ter uma velocidade maior que o navio V2A  (exceto para a versão V6 ).

Embarcações de semiplaneio e planeio apresentam $3 \leq B/T$ e as últimas $2 \leq L/B \leq 4$. Podem-se entender esses valores como limitantes físicos das concepções em estudo.

O gráfico da Figura 151 apresenta as velocidades máximas e mínimas entre as quais o regime de fluxo da embarcação se encontra no semiplaneio, para um certo comprimento.

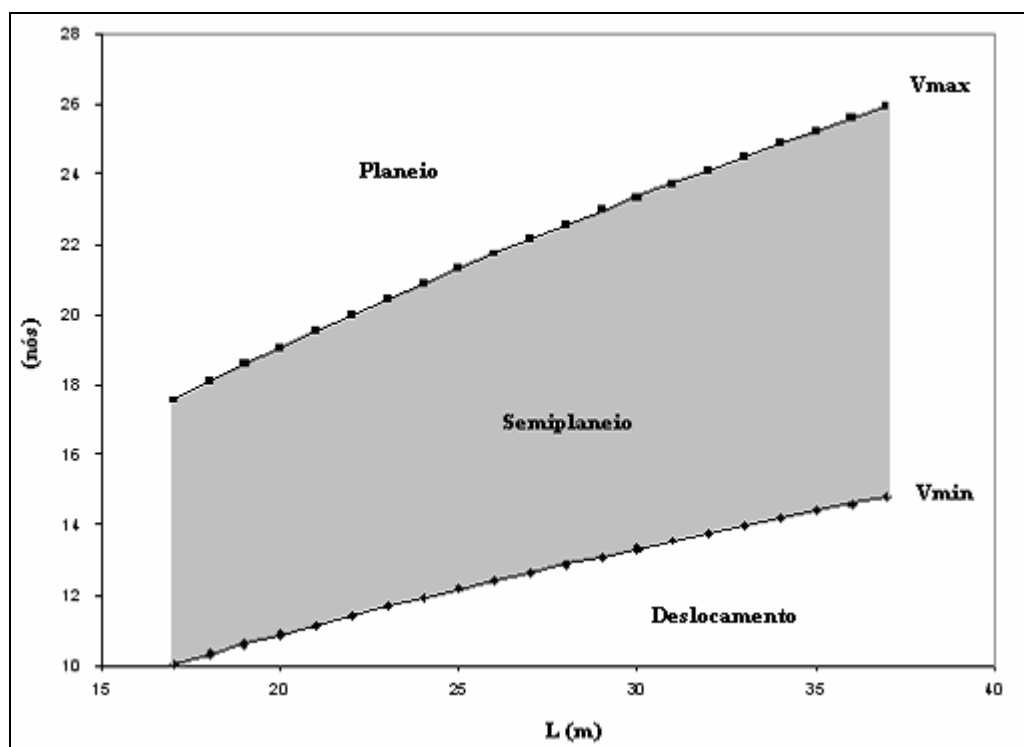


Figura 151 – Velocidades máximas (Vmax) e mínimas (Vmin) para o semiplaneio para cada comprimento de navio

Fazendo uso do estudo de sensibilidade apresentado no item 5.13.1.1 e 5.13.1.2, do gráfico da Figura 151 e das relações L/B e B/T pode-se escolher uma embarcação que satisfaça os condicionantes apresentados nesse tópico.

O estudo de sensibilidade do item 5.13.1.1 indica que as melhores embarcações de planeio encontram-se na faixa de boca aproximadamente 7, comprimento em torno de 30 m e ângulos de pé-de-caverna altos próximos de 30° . Daí surge a idéia da versão V5.

Utilizando-se do arranjo preliminar dos equipamentos da versão V2A , é possível chegar-se às dimensões da versão V5 . Essa versão inicialmente idealizada para ser um casco planador não consegue carregar todo o peso necessário ao híbrido o que a impede de planar, porque seu calado excede o calado de projeto e, portanto, perde o efeito da popa seca. O arranjo da versão V5  é mostrado na Figura 152.

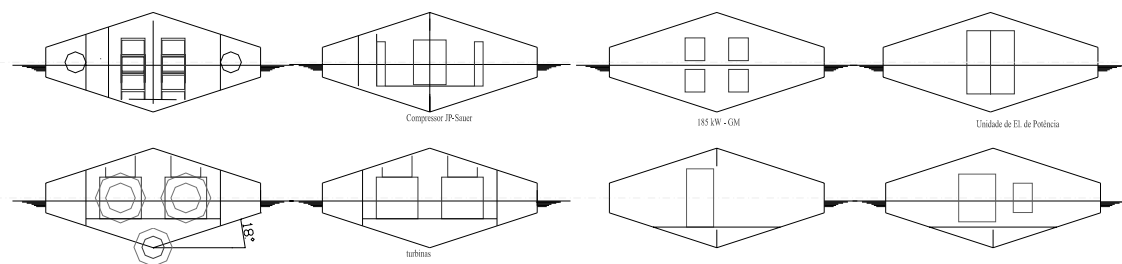


Figura 152 – Arranjo das seções transversais da V5

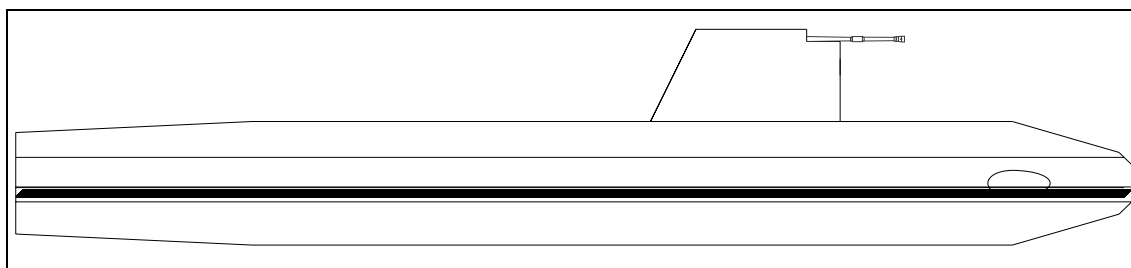


Figura 153 – Perfil da versão V5

A versão V5  foi idealizada para ser completamente simétrica em relação a um plano horizontal. Percebe-se que tal não se pode realizar sem perdas consideráveis de desempenho submerso, donde se opta pela assimetria, e essa é a razão pela qual as versões V4  e V5A  são assimétricas.

Modificando-se o arranjo de forma a possibilitar o planeio e o deslocamento, e lembrando-se do limite inferior de L/B chega-se à versão V4 . Essa versão aproveita os ganhos em comportamento em ondas para grandes ângulos de pé-de-caverna (com 30°).

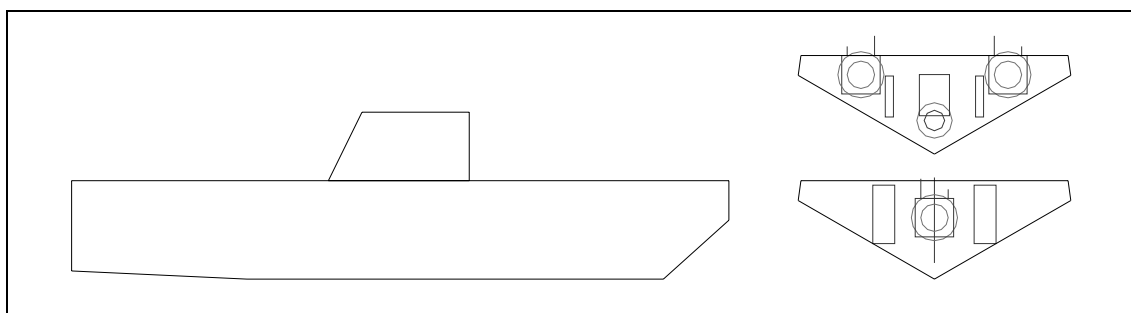


Figura 154 – Seções Transversais e perfil para a versão V4

A versão V5A  nasce do entendimento de que o semiplaneio é inevitavelmente mais econômico em termos energéticos (como mostrado no item 5.13.1.2) e mais apropriado a um navio que é muito pesado, como o patrulha submersível.

8.1 CARACTERÍSTICAS DAS VERSÕES V4 A V6

As versões V4 , V5 , V5A  e V6  têm suas dimensões principais determinadas pela interação entre velocidade, peso, arranjo dos equipamentos e busca de simetria, para a navegação submersa.

O componente mais interativo do peso é o peso estrutural, nas embarcações de sustentação dinâmica ele determina a potência e nos SWATH, a flutuabilidade. A estrutura de qualquer versão do híbrido é sempre muito mais pesada que de outro patrulha de mesmas dimensões.

Na Tabela 120 aparecem o peso de cada grupo de peso na classificação SWBS. Esses itens foram efetivamente calculados em cada uma dessas versões.

Tabela 120 – Peso das versões V4 a V6

Descrição	V4	V5	V5A	V6
Estrutura	67.72	88.46	105.00	100.00
Máquinas	47.89	44.70	47.89	58.52
Eletricidade	6.73	6.73	6.73	6.95
Comunicações	22.48	23.30	22.48	22.48
Auxiliares	25.27	25.27	25.27	25.27
Acabamento	20.51	20.51	20.51	25.84
Armamento	5.72	5.72	5.72	5.72
Soma	196.31	214.69	233.60	244.77
Lead	0.00	0.01	0.00	0.00
Peso Leve	196.31	214.70	233.60	244.77
Peso Variável	17.91	18.04	18.04	18.04
Deslocamento Superfície	214.23	232.74	251.63	262.81
Lastro	163.77	237.26	254.37	118.03
Deslocamento Total	463.00	470.00	506.00	380.85
Área Submersa	437.92	516.00	580.00	730.73
fator de aço	2.822	2.76447	2.84553	1.44928

Além dessas informações a Tabela 120 apresenta o fator de aço para cada versão. Na verdade esse nome é impróprio, pois as versões são feitas à base de alumínio, exceto a versão V6 , que combina os dois materiais.

Esse fator é aqui definido como a razão entre o peso estrutural e o comprimento da embarcação, que no cálculo estrutural, pela teoria de chapas finas e vigas é o principal determinante da tensão primária e, portanto, o principal fator do peso estrutural dos navios.

Há que se argumentar que seria mais interessante dividir o peso estrutural pelo deslocamento e, com isso, obter um fator de aço mais apropriado. Na verdade, deslocamento e comprimento se relacionam linearmente em navios semelhantes e essa razão peso estrutural/deslocamento deve, nesse raciocínio, relacionar-se por uma constante com a relação que ora se usa.

O fator de aço apresentado pelos navios apresenta-se praticamente constante igual a 2.8 t/m, nas versões de apenas um casco hidrodinâmico vale apenas 2.08 t/m para a versão V2A . Esse efeito deve-se ao fato de que a teoria que dá base ao cálculo de resistência estrutural em vasos de pressão permite a existência de estruturas mais leves. O casco cilíndrico da versão V2A  tem o fator de aço de 1.1 t/m.

Inicialmente seguindo o projeto comum de navios do tipo SWATH pensou-se em uma estrutura torpédica na forma de elipses, em que se aplicaria a teoria de chapas finas e vigas.

O peso dessa construção situa-se bem acima da faixa de 120 t, sem conseguir atender às solicitações que advém da submersão. O processo de construção da flutuabilidade e da estrutura é altamente iterativo, não convergindo, quando se considera essa teoria até os valores de peso estrutural de 250t, o que inviabiliza a flutuabilidade do SWATH .

Diante dessa situação, optou-se por entender o volume torpédico da versão V6 como aquele de um vaso de pressão e com isso aplicar-se a teoria de anéis estruturais. Nesse caso, o processo converge e pode-se inclusive utilizar-se dos escantilhões obtidos para o casco cilíndrico resistente da versão V2A , mas num diâmetro de 2.5 m e não 3.12, o que antes de superestimar a estrutura fornece-lhe um fator de segurança necessário à operação altamente não-convencional desse navio.

Na Tabela 121, apresentam-se na as dimensões principais dos navios, o raio de ação e a autonomia nesse raio de ação, a potência requerida na velocidade máxima, e na velocidade de 10 nós, *patrulha econômica*. O raio de ação considera um consumo de 257 g/kWh, e consumo da turbina na velocidade máxima e 230 g/kWh, consumo médio de um motor diesel, a 10 nós.

Todas essas embarcações têm 4 hidrojetos (os mesmos 3 da versão V2A  e outro do modelo 90SII). A versão V6,  ao contrário, que apresenta apenas uma instalação diesel elétrica (com um motor de 2000 kW, obtido de catálogos).

Tabela 121 – Características das versões V4 a V6

	V4	V5	V5A	V6
LOA (m)	24	32	36.90	29
B (m)	10	7.23	6.80	11.9
T (m)	2.64	1.57	2.06	2.66
Cx ()	0.35	0.59	0.78	~
Cwl ()	0.46	0.88	0.80	~
cb ()	0.37	0.73	0.50	~
L/LCB ()	0.42	0.54	0.47	~
B/T ()	3.79	3.45	3.45	~
L/B ()	2.40	4.43	5.43	~
Sm (m2)	212	265	265	490
Vol (m3)	215	210	266	272
LCB (m), PPAR	10.26	17.334	17.33	14.5
V (nós)	27	19	26	21
EkW	2995	2664	3756	1664.61
Rt (kN)	216	327	334	154.096
Fn ()	0.91	0.55	0.70	0.64
aut(10) (d)	205	80	146	173
RA (10) (mn)	2046	801	1457	1732
aut (h)	10	12	8	19
RA (mn)	281	222	215	393

8.2 COMENTÁRIOS ÀS VERSÕES V4, V5, V5A E V6

Esse é um trabalho apenas preliminar. Não se estudou a estabilidade, nem a manobra, nem o comportamento no mar dessas versões.

A manobra não inviabiliza nenhuma delas. A estabilidade deve ficar garantida porque são embarcações de baixo centro de gravidade e com tanques baixos (necessários à estabilidade submersa).

As versões V4  e V5  têm formas simples (chapas planas e quina) que lhes habilitam uma construção rápida e simples, e igualmente um tratamento teórico simplificado.

É digno de nota que calado, boca e comprimentos sejam tão pequenos que o tornam capaz de navegar em rios.

A versão V6  parece muito boa, mas muito grande para ocultar-se sob as águas.

9 CONCLUSÃO

A tese procura demonstrar a viabilidade (e manobrabilidade) do Navio Patrulha de Formas Não-Convencionais com Características Submersíveis através do método científico da projeção em sua modalidade de projeto de concepção, aqui muitas vezes aprofundado em nível de projeto preliminar, o que consegue.

Para tanto, primeiramente define o ambiente de trabalho dessa embarcação, seus requisitos e tenta alcançá-los, de forma criativa, com o uso do *Solution Focused Design*, ferramenta indispensável de raciocínio nesse processo.

A primeira resposta à viabilidade é dada pela versão V2A , cujo projeto, extremamente complexo, dá origem a outras respostas muito convenientes, desde que ligeiramente modificada em seus requisitos (V4  e V5 , V5A  e V6 ).

O processo realizado para verificar a viabilidade da embarcação explica o porquê de o estudo das demais versões não necessitar ser aprofundado. Isso ocorre porque a viabilidade fica garantida com a versão V2A , cujo projeto, como já dito, é o mais complexo, encontrando uma série de obstáculos.

O maior obstáculo do projeto é sem dúvida carregar o volume e o peso necessários à potência para se atingir altas velocidades, o que se torna um requisito conflitante com a necessidade de limitado volume para submergir e baixo peso para o regime de sustentação dinâmica. Por isso a utilização de turbinas é interessante minimizando o espaço e o peso a bordo.

Note-se que outro importante fator de incerteza no projeto são os sistemas auxiliares e de salvamento. Seu dimensionamento assemelha-se, mas não é idêntico aos dos submarinos.

Os pequenos submarinos hoje existentes aproveitam-se de tecnologias não disponíveis no hemisfério sul. Deles quase nada se encontra para acesso livre, dependendo de patentes e de sigilos nacionais, portanto, muitas das estimativas aqui podem estar imprecisas.

Não se solucionam essas imprecisões com apenas um trabalho de pós-graduação, mas com uma série de estudos de muitos engenheiros e testes em tanques, ou seja, desenvolvimento de tecnologia nacional de fato.

Ficam para futuras investigações o semi-SWATH, e um SWATH com propulsão Z-drive, todos esses com cascos resistentes. E, além disso, nas versões sem

casco resistente, seria interessante a investigação da cota limite de submersão, dentro da teoria de chapas finas e vigas.

A ferramenta de análise de dados (DEA) parece apresentar um amplo aspecto de desenvolvimento e, por permitir atribuir a eficiência relativa a navios, apresenta boas potencialidades também na avaliação de navios mercantes. Como pontua diretamente sobre as características das embarcações, também serve para auxiliar na determinação de requisitos razoáveis para futuras embarcações.

Recomenda-se investigações quanto aos fatores de dependência da função de mérito, desenvolvida no item 7.2.

A resistência ao avanço e a manobra do híbrido apresentam particularidades que foram vencidas com uma conveniente rotação de 90° que o aproximou dos antigos submersíveis com seções assimétricas, porém com pequenas razões B/T.

A aplicação do desacoplamento permitiu solucionar o problema de manobra de forma homogênea no plano horizontal, nas condições de superfície e submersas.

O cálculo das derivadas hidrodinâmicas parece ter atingido grau de precisão razoável, principalmente no que se refere a Y_v' . O perfil do flutuador 107 –K em muito se assemelha à versão V2A, e, portanto, deve apresentar derivadas hidrodinâmica semelhantes o que de fato ocorreu.

A recomendação de Bohlmann (1989) de acréscimo de espessura à derivada Z_w' foi descartada para a versão V2A. A aplicação da função de espessura de Hoerner (1975), proposta por Bohlmann (1989), conduz a variações imperceptíveis na faixa de valores da versão V2A. A aplicação da função de espessura de Balau (1976) afasta os resultados, pelo menos com respeito aos valores experimentais comparados.

A utilização do VLM para o cálculo da derivada Y_v' e, por analogia Z_w' , foi descartada, porque essa ferramenta não se mostrou eficiente no cálculo de asas de pequena razão de aspecto, ou seja $AR \leq 0.75$, quando em comparação com os valores experimentais da série de lemes de Balau (1976).

A utilização do VLM permitiu a substituição no plano horizontal submerso da razão $2T/L$, por D/L , encontrando erros na faixa de 22%, em relação aos valores experimentais do casco do flutuador 107-K.

Pode-se dizer que a teoria de asas de pequena razão de aspecto e as demais previsões teóricas testadas não podem prever a sustentação de um dirigível do tipo Zeppelin e, por isso, o veículo R-38(ZR-2) foi retirado da composição dos desvios médios da análise.

A formulação apresentada por Jorgensen (apud TRIANTAFYLLOU e HOVER, 2004) não se mostrou razoável para prever a sustentação de corpos axissimétricos como os apresentados na Figura 143, então não participou da análise das derivadas, como melhor explicado no item 6.17.

A escolha do método mais adequado para o cálculo das derivadas hidrodinâmicas se deu na observância de três critérios: generalidade, menor desvio com respeito aos dados experimentais e simplicidade. O menor desvio com relação aos experimentos foi considerado apenas secundariamente, porque o número de comparações é insuficiente para garantir que seja esse o critério mais importante. O critério de simplicidade, apenas no caso de empate.

Escolheu-se para o cálculo de derivadas hidrodinâmicas a idealização do navio como uma asa de pequena razão de aspecto (NORRBIN, 1971) que concorda com os valores obtidos pela teoria de corpos esbeltos (NEWMAN, 1977) quando aplicada a uma placa plana para todas as derivadas de velocidade.

Para a derivada Y_r' , no plano horizontal na superfície, entretanto, preferiu-se a formulação de Clarke, Gedling e Hine (1982) que apresenta os menores valores com os resultados experimentais.

A estabilidade no plano horizontal foi garantida com a introdução de rabetas, o que, no entanto, não altera a resistência da versão V2A, consumindo parcela da margem de segurança que se adotara para o cálculo da área molhada.

Recomenda-se que no futuro se estude o efeito de instabilização causado pela vela, que deverá aumentar a área da rabeta. Preliminarmente, entende-se que o braço da vela é muito pequeno, o que implica um acréscimo na rabeta que não afeta a resistência ao avanço, pois esse acréscimo tem $\frac{1}{4}$ da área total da vela.

A versão V2A é muito estável no plano vertical, recomenda-se que um leme retrátil deve ser acrescentado à proa, com estudo e detalhamento posterior, em que se verifiquem inclusive as derivadas de velocidade e permita uma simulação dinâmica.

O raio de giro calculado pela teoria linear não se apresenta razoável, o mesmo se podendo dizer das demais características hidrodinâmicas.

O critério de manobra propõe e instrui um processo racional de extrapolação de resultados a partir de critérios já existentes, tentando incluir a detecção através da seção reta radar da embarcação, proposta que mereceria melhor detalhamento posterior.

10 BIBLIOGRAFIA

ALLISON, J. (1993) *Marine Waterjet Propulsion*. SNAME Transactions, vol 101, pp 275-335.

ANÔNIMO (1992) *...From the Sea: Preparing the Naval Service for the 21st Century, Navy and Marine Corps White Paper*. September, 12 p. in <http://www.chinfo.navy.mil/navpalib/policy/fromsea/fromsea.txt>, Ac. 17/02/05.

ANÔNIMO [2001] *Anuário Estatístico da DEFESA NACIONAL*. Direção-Geral de Armamento e Equipamentos de Defesa. In <http://www.smallarmssurvey.org/resources/Export%20Reports/Portugal.2001.6defense.pdf>, Ac.:22/01/2006.

ANÔNIMO [2000?] *Baterias para Propulsão de Submarinos*. Saturnia in http://www.saturnia.com.br/catalogos_baterias_industiais/Bateria_para_Submarino_Portugues.pdf, Ac.:06/03/05.

ANÔNIMO (1981) BV-1033.1: *Building Specification for Ships of the Federal Armed Forces: Stability of Submarines*. Federal Board of Defence Engineering and Acquisition, Koblenz, Alemanha.

ANÔNIMO (1981) BV-104: *Normas de Construção para Navios da Marinha de Guerra: Cálculos da Resistência do Navio (Norma de Resistência)*. Tradução de Kurt Mangold, Diretoria de Engenharia Naval, Brasil.

ANÔNIMO (1982) *Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar de Montego Bay de 10-12-1982*. in http://www.diramb.gov.pt/data/basedoc/TXT_LI_6815_1_0001.htm, Ac.:19/02/05.

ANÔNIMO (2004) *DD(X) Class Multimission Destroyer, USA*. in <http://www.naval-technology.com/projects/dd21>, ac.: 17/02/05.

ANÔNIMO (2002) *DD(X) Program Description*. Northrop Grumman Corporation. USA in www.capitol.northgrum.com/programs/ddx.html, ac.: 17/02/05.

ANÔNIMO (1943) *Decreto-Lei n.º 5.452: Consolidação das Leis do Trabalho*. In https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Decreto-Lei/Del5452.htm ac. 22/01/2006.

ANÔNIMO [2003?] *Effectiveness Estimating. Notas de Aula da Disciplina 13.412 - Principles of Naval Ship Design*. Massachusetts Institute of Technology.

ANÔNIMO [2002?] *Fact sheet: Kamewa™ Waterjets, S-series*. Rolls-Royce. In http://www.rolls-royce.com/marine/downloads/pdf/propulsion/kamewa_s.pdf Ac.: 12/03/05.

ANÔNIMO (1993). Lei nº 8.617, de 4 de janeiro de 1993. Dispõe sobre o mar territorial, a zona contígua, a zona econômica exclusiva e a plataforma continental brasileiros, e dá outras providências. Brasil. in <http://www.presidencia.gov.br/CCIVIL/LEIS/L8617.htm> , Ac.:03/03/06.

ANÔNIMO (1998) *Littoral Anti-Submarine Warfare Concept* , Naval Doctrine Command in <http://www.fas.org/man/dod-101/sys/ship/docs/aswcncpt.htm>, ac.: 17/02/05.

ANONIMO (2003) *Marnet CFD Final Report and Review of The State-of-the-Art in the Application Of CFD in the Maritime and Offshore Industries* , WS Atkins Consultants. In https://pronet.wsatkins.co.uk/marnet/publications/pdf/final_report.pdf, ac. 17/02/05.

ANÔNIMO (1995) *More Power from Modern Submarine Batteries*. SUBCON 95.

ANÔNIMO (2000) *Motor Torpedo Boats*. in <http://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/pt.htm>, Ac.:17/02/05.

ANÔNIMO (2004) *New High Mobility Submarine Designed By BMT*. in <http://www.bmt.org/printnews.asp?id=95>, Ac.: 17/02/05.

ANÔNIMO (1950) *Nomenclature for treating the motion of a submerged body through a fluid*. Technical Report Bulletin 1-5, SNAME, New York.

ANÔNIMO (2003) *O Sonar na Guerra Anti-Submarino (GAS)*. Notícias de Defesa, Edição 22, jan-fev.

ANÔNIMO (1980) *Projeto da linha de eixo - Nomograma para Seleção do eixo propulsor e Notas complementares*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

ANÔNIMO (1995) *Propulsion Plants*. SUBCON 95.

ANÔNIMO (2002) *Rules for Building and Classing: Underwater Vehicles, Systems And Hyperbaric Facilities*. Houston, American Bureau of Shipping.

ANÔNIMO (2002) *Recent NPS Engineering Designs Applicable to the Expeditionary Warfare project*. Naval Postgraduate School, Monterey, California, USA. in <http://www.nps.navy.mil/sea/exwar/report/ch18.pdf>, Ac. 17/02/05.

ANÔNIMO (2001) *Recommended Practice Number 14*, SAWE, Maio in www.sawe.org/docs/rec_pract/RP14.pdf , ac. 17/02/05.

ANONIMO (1993) *Resolução A.751 Interim Standards for Ship Maneuverability*. In http://www.uscg.mil/hq/g-m/nvic/6_95/n6-95.htm, Ac. 22/01/2006.

ANÔNIMO (2002) *Small Submarines & Submersibles*. U. S. Submarines Inc., Florida , USA. in www.ussubs.com/submarines/subs.on.yachts.pdf ac. 17/02/2005.

ANÔNIMO (1988) *Submarino de Propulsão Nuclear*. Revista Maritma Brasileira in <http://planeta.terra.com.br/relacionamento/submarinosdobr/SubPropNuc.htm>, ac.: 17/02/05.

ANÔNIMO (1995) *The Fundamentals of British Maritime Doctrine*. Londres, Royal Navy.

ANÔNIMO [199-?] *Vigilância Marítima*, in <http://gasa.dcea.fct.unl.pt/infozee/3.2.htm>, Ac.: 17/02/05.

ANÔNIMO [2004?] *What is LCS?*, in <http://peoships.crane.navy.mil/lcs/program.htm>. Ac.:19/02/05.

ARANHA, J.A.P. (1990) *Notas de Aula de Hidro II*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

ARAÚJO, A. H. [2003?] *O Poder Naval Brasileiro (1984-2002) Uma Análise Crítica*, in <http://geocities.yahoo.com.br/marinhaeua/saopaulo.html>, 06.11.2003).

AROMAA, J. [2003?] *Submarine construction details*. in <http://www.hut.fi/~jaromaa/Navygallery/Submarines/subconstr.htm> . Ac.: 24/12/2004.

ARMO, K. R., 2000, *The relationship between a submarine's maximum speed and its evasive capability* , M.Sc. Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, USA. In <http://diana.gl.nps.navy.mil/~ahbuss/StudentTheses/ArmoThesis.pdf> , Ac.:19/02/05.

BALAU, J. A.C. (1976) *Séries Sistemáticas de Lemes, Projetos de Lemes e Determinação de Esforços*. 6º Congresso de Transportes Marítimos e Construção Naval, Rio de Janeiro.

BANKER, R.D., CHARNES,A. E COOPER,W.W. (1984) *Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis*. Management Science VOL. 30. Nº 9 september U.S.A, pp. 1078 a 1092.

BERTIN, D., BITTANTI, S., SAVARESI, S. M. (2000) *Decoupled cushion control in ride control systems for air cushion catamarans*. Control Engineering Practice 8, pp. 191 a 203. in <http://www.calzonispa.com/papers/Cep2000PubPaper.pdf> ac.:22/02/05.

BOGOSIAN NETO, S., LOPES N. M. A., 1997, *Projeto do Controle Ambiental e Instalação Frigorífica para um Navio Militar*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

BOGOSIAN NETO, S. e PESSE, R.(2004) *Uso de Análise Envoltória de Dados na Medida de Desempenho de Navios Militares*. In: VII Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha, Rio de Janeiro, Dec.

BOGOSIAN NETO, S. e SCHACHTER, R. D. (2004) *Concepção de Híbrido Submarino, Navio-Patrolha: Estudo de Viabilidade*. In: 20º Congresso Nacional de Transportes Marítimos, Construção Naval e Offshore, TR028, Rio de Janeiro, Oct.

BOHLMANN, H.J. (1989) *Prediction of Submarine Manouverability*. Special Supplement, Offprint from NAVAL FORCES, Internation Maritime Forum, vol. X, nº 5.

BURCHER, R. e RYDILL, L., 1994, *Concepts in Submarine Design*, Cambridge University Press, United Kingdom

BURDUN, I. e MAVRIS, D. [1998?] *Fuzzy Situational Tree-Networks (FSTN) For Knowledge Retention And Decision Making In Affordability Science*. Aerospace Instute of Technology, Geórgia Tech, USA. In http://www.asdl.gatech.edu/research_teams/pdf/1998/Task2.pdf ac.:22/02/05.

CABRAL Jr., V.P.(1997) *Projeto Corveta 97- Estudo de Comportamento no Mar*. Centro de Coordenação de Estudos da Marinha em São Paulo, São Paulo.

CABRAL Jr., V. P. e MORISHITA, H. M. (1997) *Estudo Preliminar da Estabilização do “Roll” Através do Leme*. EPUSP, São Paulo, SP, Brasil.

CANHETTI, A. C. M. (2001) *Underwater Glider for Ocean Survey*. Dissertação de MSc., University of Michigan, Michigan, USA.

CARVALHO Jr., O. M., SANTOS, S.D. O., BOGOSIAN NETO, S., ALDY, L. F. L. e KOPAVNIK, T. M. (1998a) *Fragata de Emprego Geral da Classe Tocantins*. Centro de Coordenação de Estudos da Marinha em São Paulo, São Paulo.

CARVALHO Jr., O. M., SANTOS, S.D. O., BOGOSIAN NETO, S., ALDY, L. F. L. e KOPAVNIK, T. M. (1998b) *Submarino 2500 ton*. CCEMSP, São Paulo.

CASTRUCCI, P.B.L.. e CURTI R. (1981) *Sistemas Não-Lineares*, vol.2, São Paulo, Editora Edgard Blücher LTDA.

CHARNES, A., COOPER, W. W., RHODES, E., 1978, *Measurering the Efficiency of Decision-Making Units*., European Journal of Operational Research, v. 2, pp. 429-444.

CLAEYSSSEN, J. C., MORAES, I. F. (2002) *A resposta dinâmica em modelos evolutivos e estacionários*. Bienal da Sociedade Brasileira de Matemática, Belo Horizonte, Outubro.

CLARKE, D. (1972) *A Two-Dimensional Strip Method for Surface Ship Hull Derivatives: Comparison of Theory with Experiments on a Segmented Tanker Model*. Journal of Mechanical Engineering Science, Proceedings of an International Symposium on Direction Stability and Control of Bodies Moving in Water, Vol. 14, n°7.

CLARKE, D., GEDLING, P. e HINE, G. (1982) *The Application of Maneuvering Criteria in Hull Design Using Linear Theory*. Transactions RINA, pp.45-68.

CLAUSEWITZ, K. VON (1831) *Da Guerra*. Lisboa, Europa-América.

CLAYTON, B.R. e BISHOP, R.E.D. (1982) *Mechanics of Marine Vehicles*. Londres, Spon Ltd.

COMSTOCK, E.N., BALES, S.L. e KEANE, R.G. (1980) *Seakeeping in ship Operations*. SNAME STAR Symposium, San Diego.

CORTEZ, V. A., CARVALHO, D.F., CABRAL JR., V.P.C., COSTA, T.E.A., PALMA, M.A.W. (1997) *Relatório da 1ª Fase de Projeto*. CCEMSP, São Paulo.

COUSER, P.R. , MOLLAND, A.F. , ARMSTRONG, N.A. E UTAMA, I.K.A.P. (1997) *Calm Water Powering Predictions for High-Speed Catamarans*. Fast '97, Sydney, Australia, 21st - 23rd July. in <http://www.curtin.edu.au/curtin/centre/amecrc/papers/prc97/>, ac.: 21/02/05.

CREPEL, J. L. (1989) *Hydrodynamique Navale: Manoeuvrabilité Vibrations et Rayonnement*. Notas de Aula da Disciplina ME 313, École Nationale Supérieure de Techniques Avancées, Paris, França.

CROSS, N., 1989, *Engineering Design Methods*. Great Britain, John Wiley & Sons Ltd.

FARRELL, M. (1957) *The Measurement of Productive Efficiency*. Journal of the Royal Statistical Society Series A: General, 120: 253-281.

FEITOSA, V. C. e THIOLLENT, M. [2002?] *Projeto de Pesquisa e Comunicação Científica*, Notas de Aula da Disciplina COP 762, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

FLIEDLER-FERRARA, N., PRADO, C.P.C. do (1994) *Caos, Uma Introdução*. São Paulo, Editora Edgard Blücher LTDA.

FOSSSEN, T. I. (1994) *Guidance and Control of Marine Vehicles*. West Sussex, John Wiley & Sons Ltd.

FREIRE, P. E. M., 2002, *An Investigation into the Design of an Unmanned Ship*, Dissertação de MPh., University College London, Londres.

FREITAS, E. S. (1979) *Análise Estrutural do Navio*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

GABLER, U., 1991, *Projeto de Submarinos*. Rio de Janeiro, AMRJ.

GATES, P. J., 1987, *Surface Warships. An Introduction to Design Principles*. Brassey's Defense Publishers.

GERTLER, M. (1950) *Resistance Experiments on a Systematic Series of Streamlined Bodies of Revolution—For Application to the Design of High-Speed Submarines*. R C-297, David Taylor Model Basin.

GILLMER, T. C. (1970) *Modern Ship Design*. Annapolis, United States Naval Institute.

GOFMAN, A. D., KAZMAN, M., LEBEDEVA, M.P.e RESHETOV, N. A. (1998) *On the Problem of Ship Manoeuvrability Standardization*. International Conference on Ship Motions and Manoeuvrability, Londres, 18 e 19 de fevereiro.

GOMES, E.G., MELLO, J. C. C. B. S. e BIONDI NETO, L. (2003) *Avaliação de Eficiência por Análise Envoltória de Dados: Conceitos Aplicações à Agricultura e Integração com Sistemas de Informação Geográfica*. Campinas, Embrapa. In http://www.cnpm.embrapa.br/publica/download/d28_envoltdados_vf.pdf ac.29/01/2006

GREEN J. e JOHNSON, B. (2002) *Towards a Theory of Measures of Effectiveness*. Command and Control Research and Technology Symposium, Naval Postgraduate School, Monterey, California, 11-13 June .

GUELER, G. F. (1983) *Modelagem Projeto e Análise de um Piloto Automático para Submarinos*, Tese de D.Sc., EPUSP, São Paulo, SP, Brasil.

GUERRA, Y. T. B., 1964, *A Evolução Técnica do Submarino*. São Paulo, Força Pública do Estado de São Paulo.

HARRIS, B. [2002] *World Submarine History Timeline: 1580-2000*. in <http://www.submarine-history.com/NOVAone.htm> , Ac.:18/02/05.

HOERNER, S. F., 1975, *Fluid Dynamic Lift*. P.O. Box, 342, Brick Town N. J. 08723.

HOLTROP, J., 1984, *A Statistical Re-Analysis of Resistance and Propulsion Data*, International Shipbuilding Progress, Vol.31.

IBARZ, J. F., LAMAS A. e PEÑA, F. L. (2003) *Study of The Dynamic Stability Of An Underwater Vehicle*. 8th International Conference on the Stability of Ships and Ocean Vehicles, Madri.

INOUE, S., HIRANO, M. e KIJIMA, K. (1981) *Hydrodynamic Derivatives on Ship Maneuvering*. International Shipbuilding Progress, Rotterdam, Holanda, Vol. 28, nº 321.

JACKSON, H. A. (1992) *Fundamentals of Submarine Concept*. SNAME Transactions, maio, pp 419-448.

JACOBS, W. R. (1964) *Estimation of Stability Derivatives and Indices of Various Ships Forms and Comparison with Experimental Results*. R-1035, Davidson Laboratory, setembro.

JOERGENSEN, T. S., 1998, *U.S. Navy Operations in Littoral Waters*, in www.nwc.navy.mil/press/Review/1998/spring/art2-sp8.htm, ac. 06/11/2003.

JONES, D.A., CLARKE, D.B. BRAYSHAW, I.B., BARILLON, J.L. e ANDERSON B. (2002) *The Calculation of Hydrodynamic Coefficients for Underwater Vehicles*. DSTO-TR-1329, Platforms Sciences Laboratory, Australia. In [http://www.dsto.defence.gov.au/publications/2519/DSTO-TR-1329 .pdf](http://www.dsto.defence.gov.au/publications/2519/DSTO-TR-1329.pdf). Ac.:28/11/05.

JONES, J.C. (1963) *A Method of Systematic Design*. Conference on Design Methods, Londres, Pergamon Press, pp. 54-55.

JONES, R. T. (1946) *Properties of Low-Aspect-Ratio Pointed Wings at Speeds below and above the Speed of Sound*. Report nº 835, National Advisory Committee for Aeronautics.

KORMILITSIN Y.N. & KHALIZEV, O.A., 2001, *Theory of Submarine Design*, Y.N. Kormilitsin. e Oleg A.Khalizev, Inglaterra.

LANCHARD, B.S. (1998) *System Engineering Management*. New York. John Wiley & Sons.

LAUBEUF, M. (1918) *Sous-Marins e Submersible*. Paris, Libraire Delagrave.

LEWIS, E.V. (Editor) (1989) *Principals of Naval Architecture. Vol III: Motions in Waves and Controlability*. 2ª. Rev., Jersey City, Society of Naval Architects and Marine Engineers.

LIDDELL, R. B. (1942) *The Aerodynamic Tests of Three Edo Floats for the SB2U-3, OS2U-2 and XSB2C-2 Seaplanes – NACA Models 106-K, 107-K and 125 - AH*. NACA Report nº 236, NACA.

LINS, M. P. E. e MEZA L.A. (2000) *Análise envoltória de dados e perspectivas de integração no ambiente do Apoio à Decisão*. Coordenadoria dos Programas de Pósgraduação da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

LLOYD, A. R. J. M. (1998) *Seakeeping: Ship Behaviour in Rough Weather*. Sussex, RPM Reprographics.

LOIRE, C. A. K., 1989, *The Striker: A Simplified Warship*. Defense & Armament Heracles International, nº 81, pp.54-56.

MANNING, G. C., 1964, *Teoria e Técnica de Projeto do Navio*, Centro de Publicações Técnicas da Aliança - Missão Norte-Americana de Cooperação Econômica e Técnica no Brasil – USAID, Rio de Janeiro.

MASON, D. (1975) *Submarinos Alemães – A arma oculta*, Rio de Janeiro, Editora Renes Ltda.

MIERZWICKI, T. S., 2003, *Risk Index for Multi-Objective Design Optimization of Naval Ships*. Dissertação de M.Sc., Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, USA.

MORRIS, J., MARSDEN, P.H., BISHOP, (1984) *A. Sewage Treatment in Ships*, MER, pp 5-6, Abril.

MORSE, P. M. e KIMBALL, G. E. (1970) *Methods of Operations Research*. Los Altos, Califórnia, Peninsula Publishing.

MOURA, L. A. A. (1981) *Arquitetura Naval de Submarinos*. Escritório Técnico de Construção Naval em São Paulo, São Paulo.

MUNK, M. (1924) *The Aerodynamic Forces on Airship Hulls*. NACA Report nº 184, NACA.

NEVES, M. A. S. (2003) *Dinâmica do Navio*. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

NEWMAN, J.N. (1977) *Marine Hydrodynamics*. Cambridge, The MIT PRESS.

NORRBIN N. H. (1998) *On the Stopping of Ships, including the proposal for New Standard for the Crash-Stop-Astern Capabilities*. International Conference on Ship Motions and Manoeuvrability, Londres, Reino Unido, 18 e 19 de fevereiro.

NORRBIN N. H. (1971) *Theory and Observations on the Use of a Mathematical Model for Ship Manoeuvring in Deep and Confined Waters*. Meddelanden fran Statens Skeppsprovingsanstalt nº 68, Göteborg.

ODUM, H.T., ODUM, E.P., BROWN, M.T., LAHART, D., BERSOK, C. e SENDZIMIR, J. (1988) *Environmental Systems and Public Policy*. Ecological Economics Program, University of Florida, Tradução: Ortega, E., Comar, V., Garcia, G. Bueno, I.C.B., Laserna, I.A.R., Miliuzzi, E.O., Yunes, G. e Esposito, E. in <http://www.unicamp.br/fea/ortega/eco/index.htm> ac. 29/01/2006.

OLTMANN, P.(2003) *Identification of Hydrodynamic Damping Derivatives - A Pragmatic Approach*. MARSIM'03: International Conference on Marine Simulation and Ship Maneuverability, Kanasawa, Japão, 25 a 28 de fevereiro .In <http://nippon.zaidan.info/seikabutsu/2003/00574/contents/0284.htm> Ac. 06/03/2006.

PAPOULIAS F. A. e AYDIN, I. (1994) *Out-of-Plane Solutions and Bifurcation of Submersibles in Free Positive Buoyance Ascent*. Journal of Ship Reasearch, v. 38, nº 4, dez. 1994, pp.259-271.

PÉREZ, T. e BLANKE, M. (1998?) *Mathematical Ship Modeling for Control Applications*. in www.iau.dtu.dk/secretary/pdf/TP-MB-shipmod.pdf. ac.:18/07/2005.

PESCE, C. P. (1988) *Estudo do Comportamento de Corpos Flutuantes em Ondas: Um Enfoque Variacional e Aplicações da Teoria do Corpo Esbelto*. Tese de D. Sc., EPUSP, São Paulo.

PIERONI, E. (2005) *A Aplicação da Matriz de Estrutura de Projetos no Processo de Realização de Projetos de Navios*. minuta de Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

PINHEIRO, P. e CARVALHO M., 2004, *O Planeta Terra*. In www.angelfire.com/pq/oceanografia/terra.htm, ac.:21/02/05.

PODINOVSKI, V., 2003, *The role of proportionality assumptions in data envelopment analysis*. Keele Conference Park and the 45th annual conference of The OR Society, Keele University, Newcastle-under-Lyme, UK.

PROHASKA, C. W. (1947) *The Vibration of Ships*. Shipbuilding and Marine Engine Building, novembro.

RAWSON, K. J. e TUPPER, E. C. (1978) *Basic Ship Theory*. Hong Kong, Longman Group Limited.

REVELLE, D. J. e LUMPE, L. (1994) *Third World Submarines*. SCIENTIFIC AMERICAN, agosto, pp. 16-21, in <http://members.tripod.com/~fidelispark/third/sub.htm> ac. 17/02/05.

RIBEIRO, H. J. C. (2002) *Equilíbrio Dinâmico de Cascos Planadores*. Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

RODRIGUES, M. L., PIERONI, E., MIRACCA, F.B., ARAÚJO, C. A. (1998) *Projeto de formatura-Patrolha 98*. Trabalho de Formatura, EPUSP, São Paulo.

RUDKO, D. D. (2003) *Logistical Analysis of the Littoral Combat Ship*. MSc. Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, USA.

SALLAI, A. L. & SANT'ANNA, A. P., 2003, *Alternativas de Regulação do Setor de Saúde no Brasil* in <http://www.producao.uff.br/rpep/revista1htm> , 11/11/2003.

SAUNDERS, D., TYNDALL M., E WHITEHOUSE, T. (2000) *The Role of System Modelling and Simulation in Royal Australian Navy Capability Management*. Melbourne, DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, Jul. (in www.dsto.defence.gov.au/corporate/reports/DSTO-GD-0244.pdf, ac.: 19/02/05)

SAUNDERS, H.E. (1965) *Hydrodynamics in Ship Design*. Vol.3, Nova York, SNAME.

SAVITSKY, D., 1964, *Hydrodynamic Design of Planing Hulls*, Marine Technology, Outubro, pp 71-95.

SAVITSKY, D., KOEBEL, J.G. Jr., 1993, *Seakeeping of Hard Chine Planing Hulls*, Technical and Research Panel SC-1 (Power Craft), SNAME, Junho.

SBRAGIO, R., 1995, *Projeto racional de propulsores de alto skew*. EPUSP, São Paulo.

SCHACHTER, R.D. (2003) *Problemas Especiais em Engenharia Naval – Notas de Aula da Disciplina COV 805*, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SCHACHTER, R.D. (2003) *Projeto de Embarcações de Sustentação Dinâmica – Notas de Aula da Disciplina COV 762*, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SCHACHTER, R.D., COSTA, R.V.T. (2004) *Desenvolvimento de metodologia de projeto de embarcações com asa em efeito de solo - Aplicação de um projeto-exemplo*. 20º Congresso Nacional de Transportes Marítimos, Construção Naval e Offshore, SOBENA, Rio de Janeiro, RJ.

SCHACHTER, R.D., FERNANDES, A.C., BOGOSIAN NETO, S., JORDANI, C.G., CASTRO, G. A. V. (2005) *The Solution-Focused Design Process Organization Approach Applied to Offshore Platforms Design*– Proceedings of OMAE 2005, 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Halkidiki, Greece, 12-17 June.

SCHACHTER, R.D., JORDANI, C.G., FERNANDES, A.C. (2002) *A Design Approach for Storage Spar Buoy Platforms in the Concept and Preliminary Design Phases* – Proceedings of OMAE 2002, 21st International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Oslo, Norway, 23-28 June.

SEVIGNY, *The History Of The Submarine*. in <http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Cockpit/4745/subhistory.html> , Ac.17/02/05.

SHARPE, R. (Editor) (1996) *Jane's Fighting Ships*. Jane's Information Group Inc., Alexandria, USA.

SILVA, H. B. F., 1994, *Um Modelo Baseado na Análise de Encapsulamento de Dados (Data Envelopment Analysis - DEA) para Benchmarking*, Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SILVA, M. X. V., EDAMATU, F.V., CHAGAS, A. L., RAMALHO, F. H., 1996a, *Projeto de Conceção de Submarino*. Centro de Coordenação de Estudos da Marinha em São Paulo, São Paulo.

SILVA, M. X. V., EDAMATU, F.V., CHAGAS, A. L., RAMALHO, F. H., 1996b, *Relatório do Projeto da Fragata de Emprego Geral*, CCEMSP, São Paulo.

SOVIEIRO, P. A. O., E WANDERLEY, J.B.V. (1991) *Jet inflow Simulation and its downwash effect on lifting surfaces*. Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society, Vol. 95, nº948, Outubro.

STRAUBINGER, E.K., CURRAN, W.C. e FIGHERA, V.L., 1983, *Fundamentals of Naval Surface Ship Weight Estimating*. Naval Engineers Journal, maio, pp. 127-143.

SZYMENDERA, C. J. (2002) *Computational Free Wake Analysis of a Helicopter Rotor*. Consortium for Education in Many-Body Applications CEMBA Seminar, Department of Aerospace Engineering, The Pennsylvania State University, Abril.

TAKIMOTO, A. K., OLIVEIRA, E. F. (1999) *Navio Patrulha 1999: 1º Relatório*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

TRIANTAFYLLOU, M. S. e HOVER, F. (2004) *Maneuvering and Control of Marine Vehicles*. Notas de Aula da disciplina 13.49 do Massachusetts Institute of Technology . In http://ocw.mit.edu/NR/rdonlyres/Ocean-Engineering/13-49Fall-2004/2D8F821F-A953-4631-9A8B-9DDC2ED755BB/0/1349_notes.pdf Ac. 02/01/2006.

TURRINI, A. e MIOZZI, O. O. (1999) *Sommergibili Italiani*. Roma, Ufficio Storico della Marina Italiana.

VIDIGAL, A. A. F. (1997) *Uma Estratégia Naval para o Século XXI*, Rio de Janeiro, Revista Marítima Brasileira, 3º Trimestre. (in <http://us.toto.geo.yahoo.com/toto>, 06.11.2003).

YOSHIMURA, Y. (2001) *Investigation into the Yaw-Checking Ability in Ship Manoeuvrability Standard*. Proceedings of Prediction of Ship Manoeuvring Performance, Tokyo, Japão, 18 Out.

APÊNDICES

A) FORÇAS DE INÉRCIA ¹⁶

Segue-se o mesmo expediente que em Neves (2003). Atribuindo-se o índice G para designar o centro de gravidade, a velocidade do Centro de Gravidade, $\vec{U}_G$, é dada pela velocidade do ponto C (origem), $\vec{U}$, e do raio vetor $\vec{r}_G$ que liga esse ponto ao centro de gravidade assim (Figura 122 e Figura 123):

$$\vec{U}_G = \vec{U} + \frac{d}{dt} \vec{r}_G \quad (447)$$

Derivando $\vec{r}_G$ com respeito ao tempo:

$$\frac{d}{dt} \vec{r}_G = \frac{d}{dt} \vec{u}_G + \Omega \wedge \vec{r}_G = \Omega \wedge \vec{r}_G \quad (448)$$

onde $\vec{u}_G$ é a velocidade no referencial girante entre C e G, que deve ser zero, pois é um corpo rígido. O que faz:

$$\vec{U}_G = \vec{U} + \Omega \wedge \vec{r}_G \quad (449)$$

onde Ω é a velocidade angular do referencial girante, portanto do corpo rígido.

Aplicando a 2ª. Lei de Newton ao sistema, a variação no tempo da quantidade de movimento Q, deve igualar as forças externas:

$$\sum \vec{F}_{ext} = \frac{d}{dt} Q = \frac{d}{dt} (m \vec{U}_G) = \frac{d}{dt} [m(\vec{U} + \Omega \wedge \vec{r}_G)] \quad (450)$$

onde m é a massa do corpo, que por hipótese não varia. Expandindo o produto tem-se:

$$\sum \vec{F}_{ext} = m \frac{d}{dt} \vec{U} + \frac{d}{dt} (m \Omega \wedge \vec{r}_G) \quad (451)$$

e então, para o primeiro termo do lado direito

$$\frac{d\vec{U}}{dt} = \frac{dU}{dt} \vec{i} + \frac{dV}{dt} \vec{j} + \frac{dW}{dt} \vec{k} + U \frac{d\vec{i}}{dt} + V \frac{d\vec{j}}{dt} + W \frac{d\vec{k}}{dt} \quad (452)$$

onde

$$\frac{d\vec{i}}{dt} = \vec{\Omega} \wedge \vec{i} = r\vec{j} - q\vec{k} \quad (453)$$

$$\frac{d\vec{j}}{dt} = \vec{\Omega} \wedge \vec{j} = -r\vec{i} + p\vec{k} \quad (454)$$

$$\frac{d\vec{k}}{dt} = \vec{\Omega} \wedge \vec{k} = q\vec{i} - p\vec{j} \quad (455)$$

o que dá:

¹⁶ por simplicidade, emprega-se indiferentemente $\vec{i}, \vec{j}$ e $\vec{k}$ no lugar de $\vec{i}, \vec{j}$ e $\vec{k}$

$$\frac{d\vec{U}}{dt} = i(\dot{U} - Vr + Wq) + j(\dot{V} + Ur - Wp) + k(\dot{W} - Uq + Vp) \quad (456)$$

e então, para o primeiro segundo termo do lado direito, com $y_G=0$.

$$\frac{d}{dt}(\vec{\Omega} \wedge \vec{r}_G) = \frac{d}{dt} \begin{vmatrix} i & j & k \\ p & q & r \\ x_G & 0 & z_G \end{vmatrix} \quad (457)$$

Que expandido dá:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\vec{\Omega} \wedge \vec{r}_G) = & i[z_G(pr + \dot{q}) - x_G(q^2 + r^2)] + j[x_G(\dot{r} + pq) - z_G(\dot{p} - qr)] + \\ & + k[x_G(pr - \dot{q}) - z_G(p^2 + q^2)] \end{aligned} \quad (458)$$

Somando ambos os termos e decompondo-os agora nas direções x, y e z e, as forças de inércia são expressas a seguir e podem ser encontradas em Fossen (1994), pp. 26:

$$X = m[\dot{U} + Wq - Vr - x_G(q^2 + r^2) + z_G(pr + \dot{q})] \quad (459)$$

$$Y = m[\dot{V} + Ur - pW + x_G(pq + \dot{r}) + z_G(qr - \dot{p})] \quad (460)$$

$$Z = m[\dot{W} + Vp - Uq - x_G(pr - \dot{q}) - z_G(p^2 + q^2)] \quad (461)$$

B) MOMENTOS¹⁷

Seja o momento angular de uma partícula com relação a um ponto, P, qualquer, definido como o produto vetorial entre a quantidade de movimento desse ponto, $m_i v_i$, e o raio vetor entre essa partícula e o ponto, $\vec{r}_p$, assim:

$$\vec{h}_p = \vec{r}_p \wedge m_i \vec{v}_i \quad (462)$$

A velocidade do ponto, v_i , por sua vez, é a derivada do raio vetor $\vec{R}_i$ com relação ao referencial absoluto, assim:

$$\vec{v}_i = \frac{d}{dt} \vec{R}_i \quad (463)$$

O momento angular do corpo com relação ao centro de gravidade, G, corresponde ao somatório do momento angular de cada partícula em relação ao centro de gravidade, e chamando-o de $\vec{h}_G$, tem-se :

$$\vec{h}_G = \sum_i \vec{r}_G \wedge m_i \frac{d}{dt} \vec{R}_i \quad (464)$$

onde i é a partícula de massa i, $\vec{R}_i$ o raio vetor com relação ao referencial absoluto

Lembrando que,

$$\frac{d}{dt} \vec{R}_i = \vec{U} + \frac{d\vec{r}_i}{dt} = \vec{U} + \vec{\Omega} \wedge \vec{r}_i \quad (465)$$

onde r_i é o raio vetor com relação ao referencial girante, e U é o vetor velocidade da origem girante, C. Chamando-se de $\vec{r}_{Gi}$ o raio vetor relativo entre o centro de gravidade e esse ponto i:

$$\vec{r}_{Gi} = \vec{r}_i - \vec{r}_G \quad (466)$$

Dessa forma, tem-se:

$$\vec{h}_G = \sum_i (\vec{r}_i - \vec{r}_G) \wedge m_i (\vec{U} + \vec{\Omega} \wedge \vec{r}_i) \quad (467)$$

o que faz

$$\vec{h}_G = \sum_i m_i \vec{r}_i \wedge \vec{U} + \sum_i m_i \vec{r}_i \wedge \vec{\Omega} \wedge \vec{r}_i - \sum_i m_i \vec{r}_G \wedge \vec{U} - \sum_i m_i \vec{r}_G \wedge \vec{\Omega} \wedge \vec{r}_i \quad (468)$$

lembrando que

$$\vec{r}_G = \sum_i m_i \vec{r}_i / m \quad (469)$$

¹⁷ por simplicidade, emprega-se indiferentemente i, j e k no lugar de $\vec{i}$, $\vec{j}$ e $\vec{k}$

definindo $\vec{h}$ como o momento angular com relação à origem:

$$\vec{h} = \sum_i m_i \vec{r}_i \wedge \vec{\Omega} \wedge \vec{r}_i \quad (470)$$

$$\vec{h}_G = m \vec{r}_G \wedge \vec{U} + \sum m_i \vec{r}_i \wedge \vec{\Omega} \wedge \vec{r}_i - m \vec{r}_G \wedge \vec{U} - m \vec{r}_G \wedge (\vec{\Omega} \wedge \vec{r}_G) \quad (471)$$

e então

$$\vec{h}_G = \vec{h} - m \vec{r}_G \wedge (\vec{\Omega} \wedge \vec{r}_G) \quad (472)$$

se

$$\vec{r}_i = x_i \vec{i} + y_i \vec{j} + z_i \vec{k} \quad (473)$$

Escrevendo $\vec{h}$ em componentes cartesianas, se

$$\begin{aligned} \vec{h} = & i \left[p \sum_i (y_i^2 + z_i^2) m_i - q \sum_i x_i y_i m_i - r \sum_i x_i z_i m_i \right] + \\ & j \left[-p \sum_i x_i y_i m_i + q \sum_i (x_i^2 + z_i^2) m_i - r \sum_i y_i z_i m_i \right] + \\ & k \left[-p \sum_i x_i z_i m_i - q \sum_i y_i z_i m_i + r \sum_i (x_i^2 + y_i^2) m_i \right] \end{aligned} \quad (474)$$

Os valores dentro dos somatórios são parcelas de produtos e momentos de inércia em relação aos eixos x, y e z, móveis. A representação forma matricial é bem conveniente:

$$\vec{h} = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} \quad (475)$$

Supondo por hipótese todos os momentos de inércia desprezíveis ou iguais a zero, tem-se:

$$\vec{h} = I_{xx} p \vec{i} + I_{yy} q \vec{j} + I_{zz} r \vec{k} \quad (476)$$

Aplicando-se agora a 2ª Lei de Newton para momentos, no ponto C, tem-se:

$$\sum \vec{M}_G = \frac{d}{dt} \vec{h}_G \quad (477)$$

onde $\vec{M}_G$ é somatório de momentos no centro de gravidade, G.

Calculando o momento com relação ao ponto C, tem-se:

$$\sum \vec{M} = \frac{d}{dt} \vec{h}_G + \vec{r}_G \wedge \sum \vec{F} \quad (478)$$

onde $\sum \vec{F}$ é a resultante das forças aplicadas ao centro de massa.

$$\sum \vec{M} = \frac{d}{dt} \vec{h} - \frac{d}{dt} (m \vec{r}_G \wedge \vec{\Omega} \wedge \vec{r}_G) + \vec{r}_G \wedge \sum \vec{F} \quad (479)$$

Chamando respectivamente de π_1 , π_2 e π_3 respectivamente aos três termos do lado direito da equação anterior, tem-se:

$$\sum \vec{M} = \vec{\pi}_1 + \vec{\pi}_2 + \vec{\pi}_3 \quad (480)$$

Expandindo o 1º termo do lado direito, π_1 , tem-se:

$$\begin{aligned} \vec{\pi}_1 &= \frac{d}{dt} \vec{h} = \frac{d}{dt} (I_{xx} p \vec{i} + I_{yy} q \vec{j} + I_{zz} r \vec{k}) = \\ &= I_{xx} p \frac{d}{dt} \vec{i} + I_{yy} q \frac{d}{dt} \vec{j} + I_{zz} r \frac{d}{dt} \vec{k} + I_{xx} \dot{p} \vec{i} + I_{yy} \dot{q} \vec{j} + I_{zz} \dot{r} \vec{k} \end{aligned} \quad (481)$$

e então,

$$\frac{d}{dt} h = i[I_{xx} \dot{p} + q r (I_{zz} - I_{yy})] + j[I_{yy} \dot{q} + p r (I_{xx} - I_{zz})] + k[I_{zz} \dot{r} + p q (I_{yy} - I_{xx})] \quad (482)$$

Desenvolvendo o 2º termo do lado direito, π_2 , com $y_G = 0$, tem-se:

$$\Omega \wedge r_G = \begin{vmatrix} i & j & k \\ p & q & r \\ x_G & 0 & z_G \end{vmatrix} = i(qz_G) + j(rx_G - pz_G) + k(-qx_G) \quad (483)$$

$$\begin{aligned} r_G \wedge \Omega \wedge r_G &= \begin{vmatrix} i & j & k \\ x_G & 0 & z_G \\ qz_G & rx_G - pz_G & -qx_G \end{vmatrix} = + \\ &+ i(pz_G^2 - rz_G x_G) + j(qz_G^2 + qx_G^2) + k(rx_G^2 - pz_G x_G) \end{aligned} \quad (484)$$

lembrando que se trata de um corpo rígido, as coordenadas do baricentro possuem derivadas nulas no sistema fixo ao corpo.

$$\begin{aligned} \vec{\pi}_2 / m &= - \frac{d}{dt} \vec{r}_G \wedge \vec{\Omega} \wedge \vec{r}_G = - \\ &- i(\dot{p}z_G^2 - \dot{r}z_G x_G) - j(\dot{q}z_G^2 + \dot{q}x_G^2) - k(\dot{r}x_G^2 - \dot{p}z_G x_G) - \\ &- \frac{di}{dt} (pz_G^2 - rz_G x_G) - \frac{dj}{dt} (qz_G^2 + qx_G^2) - \frac{dk}{dt} (rx_G^2 - pz_G x_G) \end{aligned} \quad (485)$$

aplicando as derivadas aos vetores i, j e k, pode-se reagrupar os termos no sistema coordenado fixo ao corpo.

$$\begin{aligned}
\vec{\pi}_2 / m = & -i(\dot{p}z_G^2 - \dot{r}z_G x_G - qrz_G^2 - qrx_G^2 + qrx_G^2 - pqz_G x_G) \\
& - j(\dot{q}z_G^2 + \dot{q}x_G^2 + prz_G^2 - r^2 z_G x_G - prx_G^2 + pz_G x_G) \\
& - k(\dot{r}x_G^2 - \dot{p}z_G x_G - pqz_G^2 + rqz_G x_G + pqz_G^2 + pqx_G^2)
\end{aligned} \quad (486)$$

simplicando o termo $\vec{\pi}_2$, tem-se:

$$\begin{aligned}
\vec{\pi}_2 / m = & -i(\dot{p}z_G^2 - \dot{r}z_G x_G - qrz_G^2 - pqz_G x_G) \\
& - j(\dot{q}z_G^2 + \dot{q}x_G^2 + prz_G^2 - r^2 z_G x_G - prx_G^2 + pz_G x_G) \\
& - k(\dot{r}x_G^2 - \dot{p}z_G x_G - pqz_G^2 + rqz_G x_G + pqz_G^2 + pqx_G^2)
\end{aligned} \quad (487)$$

desenvolvendo o termo $\vec{\pi}_3$, tem-se:

$$\vec{\pi}_3 = \vec{r}_G \wedge \sum F = \begin{vmatrix} i & j & k \\ x_G & 0 & z_G \\ X & Y & Z \end{vmatrix} = +i(-z_G Y) + j(z_G X - x_G Z) + k(x_G Y) \quad (488)$$

Expandindo o segundo membro da equação anterior:

$$\begin{aligned}
\vec{\pi}_3 = & i\{-z_G m[\dot{V} + Ur - pW + x_G(pq + \dot{r}) + z_G.(q.r - \dot{p})]\} \\
& + j\{z_G m[\dot{U} + Wq - Vr - x_G(q^2 + r^2) + z_G.(p.r + \dot{q})] - \\
& - x_G m[\dot{W} + Vp - Uq + x_G(p.r - \dot{q}) - z_G(p^2 + q^2)]\} \\
& + k\{x_G m.[\dot{V} + Ur - pW + x_G.(p.q + \dot{r}) + z_G.(q.r - \dot{p})]\}
\end{aligned} \quad (489)$$

Simplificando as expressões em termos de suas componentes cartesianas:

$$\begin{aligned}
K = & (\vec{\pi}_1 + \vec{\pi}_2 + \vec{\pi}_3).i = \\
& I_{xx}\dot{p} + qr(I_{zz} - I_{yy}) - m(\dot{p}z_G^2 - \dot{r}z_G x_G - qrz_G^2 - pqz_G x_G) - \\
& - z_G m[\dot{V} + Ur - pW + x_G(pq + \dot{r}) + z_G.(q.r - \dot{p})]
\end{aligned} \quad (490)$$

Que pode ser simplificado para

$$K = I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr - mz_G.(\dot{v} + Ur - pW) \quad (491)$$

As componentes em y tornam-se

$$\begin{aligned}
M = & (\vec{\pi}_1 + \vec{\pi}_2 + \vec{\pi}_3).j = \\
& I_{yy}\dot{q} + pr(I_{xx} - I_{zz}) - m(\dot{q}z_G^2 + \dot{q}x_G^2 + prz_G^2 - r^2 z_G x_G - prx_G^2 + pz_G x_G) \\
& + m\{z_G[\dot{U} + Wq - Vr - x_G(q^2 + r^2) + z_G.(p.r + \dot{q})] - \\
& - x_G[\dot{W} + Vp - Uq + x_G(p.r - \dot{q}) - z_G(p^2 + q^2)]\}
\end{aligned} \quad (492)$$

$$M = I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz}).pr + m[z_G.(\dot{u} + qW - rV) - x_G.(\dot{w} + pV - qU)] \quad (493)$$

E finalmente as componentes em z:

$$\begin{aligned}
N &= (\vec{\pi}_1 + \vec{\pi}_2 + \vec{\pi}_3).k = \\
&I_{zz}\dot{r} + pq(I_{yy} - I_{xx}) \\
&- m(\dot{r}x_G^2 - \dot{p}z_Gx_G + rqz_Gx_G + pqx_G^2) + \\
&+ x_Gm.[\dot{V} + Ur - pW + x_G.(p.q + \dot{r}) + z_G.(q.r - \dot{p})]
\end{aligned} \tag{494}$$

$$N = I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx}).p.q + mx_G.(\dot{v} + Ur - pW) \tag{495}$$

C) VOLUME ÚTIL NO INTERIOR DE UM CILINDRO

A área do plano do piso, no interior de um casco cilíndrico, não pode ser completamente aproveitada para arranjo em razão de que seu pé-direito variável tende a zero nas extremidades.

A Figura 155 mostra o volume útil no interior de um casco resistente que seja composto de um único convés. Descobrir o volume útil no interior do cilindro corresponde a responder a duas questões:

- (i) qual a altura em que se deve instalar o piso?;
- (ii) qual é o valor do par (x,y) (definidos na Figura 155) que otimiza o volume útil, ou seja que minimiza as perdas, chamadas de p, simplificadaamente?

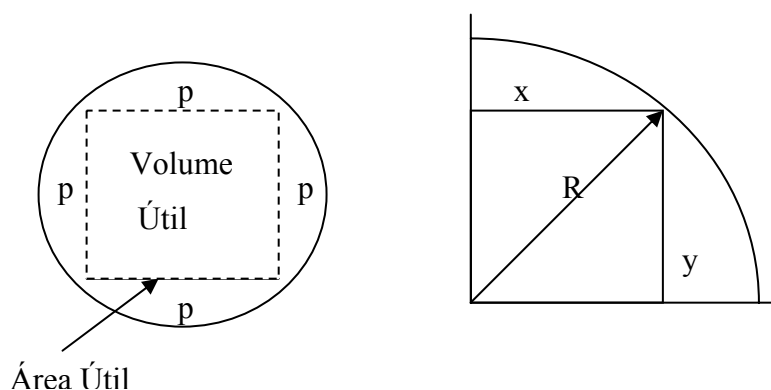


Figura 155 – Área útil no interior do cilindro

Na Figura 155 , p são as perdas, x e y as coordenadas do vértice do quadrilátero que envolve o volume útil que se quer determinar e R o raio do casco resistente.

Trata-se o problema com a ajuda da simetria da figura, e se calcula apenas um quarto dela para uma profundidade unitária.. Pode-se definir a perda total por:

$$p = \pi R^2 / 4 - xy \quad (496)$$

Para se minimizar a função, calcula-se sua derivada total assim:

$$dp = \frac{\partial p}{\partial x} dx + \frac{\partial p}{\partial y} dy = 0 \quad (497)$$

ou seja,

$$dp = \pi(x + y)/4 - x - y = 0 \quad (498)$$

onde x e y são pontos da circunferência $R^2 = x^2 + y^2$ e, fazendo-se essa substituição, tem-se que o menor valor de perda acontece para

$$x = \frac{R}{2} \sqrt{2} \quad (499)$$

Isso significa que a figura que maximiza ou minimiza a área útil é um quadrado. Inspeccionando a segunda derivada fica claro que se trata de um máximo, pois

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 p}{\partial x \partial y} < 0$$

As perdas por sua vez em valor absoluto são;

$$p = \text{Área}_{\text{círculo}} - \text{Área}_{\text{quadrado}} \quad (500)$$

$$p = \pi R^2 - 2R^2 = R^2(\pi - 2) \quad (501)$$

isso dá um coeficiente de área útil igual a

$$\text{Área}_{\text{útil}} / \text{Área}_{\text{círculo}} = 2R^2 / \pi R^2 = 2 / \pi = 0.63.$$

Deve-se contudo lembrar que o valor acima é muito rigoroso, pois os espaços laterais entendidos como perdas não o são totalmente, podem servir mesmo de passagem quando têm mais de 1 m.